

Tartu Ülikool
Loodus- ja täppisteaduste valdkond
Ökoloogia ja maateaduste instituut
Geoloogia osakond

Marlen Hunt

**Selja jõe valgla veebilansi modelleerimine rakendades
PRMS hüdroloogilist mudelit**

Magistritöö geoloogias (30 EAP)

Juhendajad: Andres Marandi, PhD
Enn Karro, PhD

Kaitsmisele lubatud:

Juhendaja:

Tartu 2021

Selja jõe valgla veebilansi modelleerimine rakendades PRMS hüdroloogilist mudelit

Mõistmaks ja hindamaks linnastumise, maakasutuse (põllumajanduse intensiivistumise) ning kliimamuutuste mõju pinna- ja põhjaveevarudele ning dünaamikale on oluline mõista valgla hüdroloogilist ja hüdrogeoloogilist situatsiooni. Antud magistritöö eesmärkideks on selgitada PRMS (*The Precipitation-Runoff Modeling System*) ehk pinnavee äravoolukomponentide mudeldamiskompleksi ja olemasolevate algandmete sobivus Eesti geoloogilistes oludes hüdroloogiliseks mudeldamiseks ning leida Selja jõe valgla veebilanss. Töö käigus koostati Selja jõe valglale hüdroloogiline mudel valideerimistulemusega $NSE = 0,749$, mis väljendab head mudeli efektiivsust vooluhulkade modelleerimisel. Saadud mudeli tulemuste põhjal loodi Selja jõe valglale madalvee ning kõrgvee (kevadise ja sügisese) perioodiks kontseptuaalsed mudelid, mis kirjeldavad antud uuringuala veebilanssi.

Märksõnad: pinnavesi, põhjavesi, modelleerimine, GIS

CERCS kood: P470 – Hüdrogeoloogia, geoplaneering ja ehitusgeoloogia

Modeling of the water balance in the Selja River basin with the PRMS hydrological model

Knowledge of the hydrological and hydrogeological situation of the river basin is important for understanding and estimating the impact of urbanization, land use (intensified agriculture) and climate change on surface water and groundwater resources and dynamics. The aims of this Master's thesis are to ascertain suitability of PRMS (the Precipitation-Runoff Modeling System, version 4) and the existing source data for hydrological modeling in Estonian geological conditions and to determine the water balance of the Selja River basin. The work involved the preparation of hydrological model of the Selja River basin, with a validation result of $NSE = 0.749$ indicating good efficiency in the modeling of flow rates. The results of modeling were used to create conceptual models for low water and highwater (autumn and spring) periods in the Selja River basin, describing the water balance in the study area.

Keywords: surface water, groundwater, modeling, GIS

CERCS code: P470 – Hydrogeology, geographical and geological engineering

Sisukord

Sissejuhatus	5
1. Teoreetilised alused	7
1.1 Veebilansi komponendid.....	7
1.1.1 Infiltratsioon	7
1.1.2 Evaporatsioon	8
1.1.3 Transpiratsioon	10
1.1.4 Äravool.....	10
1.2 Varasemad äravoolumäärangud Eestis	11
2. Uuringuala iseloomustus.....	12
3. Programmpakett PRMS	16
3.1 Pindmine äravool (<i>surface runoff</i>).....	18
3.2 Maasisene ehk vaheäravool (<i>subsurface flow; interflow</i>).....	19
3.3 Põhjavee äravool (<i>groundwater flow</i>).....	22
4. Andmed ja meetodika.....	24
4.1 Rajatingimused	24
4.1.1 Mudeli võrk	25
4.1.2 Kõrgusmudel.....	26
4.1.3 Vooluvõrk.....	26
4.1.4 Taimkate	27
4.1.5 Pinnakate	27
4.1.6 Maapinna veeläbilaskvus.....	29
4.1.7 Vaatlusandmete töötlemine	29
4.2 Hüdrograafi lõikamine	33
5. Tulemused ja arutelu.....	35
5.1 Tundlikkusanalüüs	36
5.2 Kalibreerimine ja valideerimine	36

5.3 Baasäravool ja netoinfiltratsioon	39
5.4 Kontseptuaalne mudel.....	43
Kokkuvõte.....	47
Modeling of the water balance in the Selja River basin with the PRMS hydrological model .	49
Tänuavaldused.....	51
Kasutatud kirjandus	52

Sissejuhatus

ÜRO veemajandusaruandes prognoositakse, et veetarbimine suureneb aastaks 2050 kuni 50%. Säästva veemajanduse probleemid on piirkonniti erinevad, kuid nende kvantitatiivse analüüsi meetodite tõhustamine võiks aidata kaasa optimaalse veekasutuse kavandamisele (WWAP – ÜRO ülemaailmne veehindamise programm, 2015).

Mõistmaks linnastumise, maakasutuse (nt põllumajanduse intensiivistumise) ning kliimamuutuste mõju pinna- ja põhjaveelarudele ning dünaamikale on oluline teada valglate üldisi hüdroloogilisi ja hüdrogeoloogilisi olusid (Abbaspour et al., 2015; Adeogun et al., 2014; Malagò et al., 2016). Kirjeldatud mõjude hindamiseks kasutatakse ühe meetodina sademe-äravoolu mudeleid, mille väljundina arvutatakse valgla veebilanss, mis sisaldab pindmise, maasisese ja põhjavee äravoolu, infiltratsiooni ning aurustumise osakaalu uuritavas valgla (Kumar et al., 2016; Magilligan and Nislow, 2005; Miller et al., 2014).

Usaldusväärsete äravoolude simulatsioon on oluline mitte ainult valgla olemasolevate veevarude haldamiseks, vaid ka selleks, et mõista muutusi pinna- ja ülemiste põhjaveekihtide keemilises koostises. Kõige uuemad Eestis läbi viidud uuringud (Marandi jt, 2020, 2019) põhjaveekogumite seisundi ja koormusallikate hindamiseks näitavad, et 31 põhjaveekogumist kaheksa koondseisund on halb ja 11 hea, kuid ohustatud. Neist viie puhul on leitud, et põhjaveekogumiga seotud voolu- ja pinnaveekogumi keemiline või koguseline koondseisund on halb või ohustatud ning võib olla tingitud põhjavee toitest. Võimalike reostusallikatena on välja toodud põllumajanduslik hajukoormus, kaevandamise mõjud ja veevõttust tingitud koormus. Samuti on täheldatud, et õhukese pinnakattega nitraaditundlikel aladel on nitraadi kontsentratsioonid põhjavees vaatamata erinevatele meetmetele pigem suurenenud (Leisk, 2021, 2020; Marja jt, 2017).

Käesoleva magistritöö eesmärk on selgitada PRMS (*The Precipitation-Runoff Modeling System*) ehk pinnavee äravoolukomponentide mudeldamiskompleksi ja olemasolevate algandmete sobivust hüdroloogiliseks mudeldamiseks Eesti geoloogilistes oludes ning kogutavate andmete kontekstis ja leida ühe näidisvalgla veebilanss. USA Geoloogiateenistuse loodud PRMS metoodika (Markstrom et al., 2015b) valiti, kuna valminud mudelit on võimalik ühendada Eestis laialdaselt kasutusel oleva põhjavee dünaamika mudeldamiseks mõeldud MODFLOW mudelitega (Hughes et al., 2017; Polikarpus jt, 2017; Puura jt, 2018; Terasmaa jt, 2019). PRMS ja MODFLOW ühildamisel on edaspidi pinna- ja põhjavee seoste veel paremaks

mõistmiseks võimalik luua GSFlow (*Coupled Groundwater and Surface-Water Flow*) mudel (Markstrom et al., 2015a).

Uuringualaks valiti Selja jõe valgla, mille kaks alamvalglat (Selja, Sõmeru) kuuluvad Keskkonnaministeeriumi juhtimisel 2018. aasta lõpus alustatud ja 10 aastat kestva veekogumite seisundi parandamise projekti LIFE IP CleanEST rakenduspiirkonda. LIFE IP CleanEst alamprojekti C.10.1 kitsam eesmärk on uurida põllumajanduse mõju põhja- ja läbi selle ka pinnaveele (Iital jt, 2020). Samuti on Selja jõe valglale jäävate alamvalglate koondseisundid hinnatud 2019. aasta seisuga kesiseks (Sõmeru, Selja_2, Soolikoja) või halvaks (Selja_1, Selja_3) (Muna jt, 2020).

1. Teoreetilised alused

1.1 Veebilansi komponendid

Hüdroloogias väljendab veebilanss veesüsteemist väljuva ja siseneva veemahu tasakaalustatud vahekorda kindla ajaühiku kohta, mida võib väljendada võrrandiga (Viessman Jr. and Lewis, 1996):

$$P = Q + E + \Delta S \quad (1-1)$$

P – sademete kogus, mm;

Q – äravool, mm;

E – evapotranspiratsioon, mm;

ΔS – veevaru muutus, mm.

1.1.1 Infiltratsioon

Infiltratsioon on protsess, mille käigus sademe- ja pinnavesi imbub raskus- ja kapillaarjõudude koosmõjul pinnasesse. Pinnase infiltratsioonivõime sõltub kliimaatilistest teguritest (sademete hulk, tüüp ja kestus, õhutemperatuur, niiskus), pinnase niiskusesisaldusest, poorsusest, orgaanikasisaldusest ning pinna- ja taimkattest (Kirkham, 2014). Infiltratsiooni kirjeldatakse mudelites üldjuhul Richardsi (1931), Hortoni (1933) või Green-Ampti (1911) valemiga.

Richardsi võrrand on üks esimesi matemaatilisi võrrandeid, mis kirjeldab vee liikumist küllastamata pinnases raskus- ja kapillaarjõudude mõjul. Richardsi võrrandi analüütilised lahendid sobivad lihtsustatud juhtumite korral, mistõttu enamikes praktilistes situatsioonides pole antud võrrand kasutatav (Richards, 1931).

Hortoni mudel on empiiriline ja rakendatav, kui sademete ja lumesulavee kogus ületab pinnase infiltratsioonivõime. Hortoni valem arvutab infiltratsioonivõime ajast sõltuvalt kogu vihma vältel. Hortoni valem on järgmine (Horton, 1933):

$$f_t = f_c + (f_0 - f_c)e^{-kt} \quad (1-2)$$

f_t – pinnase infiltratsioonivõime ajahetkel t , ft/s;

f_c – minimaalne infiltratsioonivõime, ft/s;

f_0 – maksimaalne infiltratsioonivõime, ft/s;

k – kahanemiskoeffitsient, s⁻¹;

t – aeg vihma algusest, s.

Green-Ampti valem põhineb Darcy seadusel ja kirjeldab detailselt infiltratsiooni protsessi. Antud meetodi eelis võrreldes Hortoni meetodiga on pinnase parameetrite mõõdetavus. Green-Ampti valem on esitatud järgmiselt (Green and Ampt, 1911):

$$f(t) = K \left[\frac{\psi \Delta \theta}{F(t)} + 1 \right] \quad (1-3)$$

ψ – kapillaarlang (*wetting front soil suction head*);

θ – pinnase veesisaldus;

K – filtratsioonimoodul, cm/h;

$F(t)$ – infiltreerunud vesi, cm.

Netoinfiltratsioon kujutab seda osa infiltreerunud veest, mis liigub mööda aeratsioonivööndit põhjaveekihti. Netoinfiltratsiooni mõjutavad nii reljeef, pinnase omadused, taimkatte kui ka kliimaatilised tingimused (Freeze and Cherry, 1979).

1.1.2 Evaporatsioon

Evaporatsioonil ehk aurumisel toimub vedelas olekus vee üleminek gaasiliseks. Aurumine on väiksem suure suhtelise õhuniiskuse korral ja seda soodustab kõrgem vee- ning õhutemperatuur, suurem tuule kiirus ja päiksekiirguse hulk. Aurumine sõltub peale kliimaatiliste tegurite ka pinnase omadustest ja taimkattest (Maastik, 2006).

Pinnavee äravoolukomponentide mudeldamiskompleksid kasutavad üldiselt arvutustes nii aurumist kui ka potentsiaalset aurumist (PET). Potentsiaalne aurumine näitab maksimaalset võimalikku vee hulka, mis võib vee pinnalt aurustuda. Tegelik aurumine arvutatakse sageli potentsiaalse aurumise alusel (Kirkham, 2014).

Potentsiaalse aurumise mõiste võttis esimesena kasutusele Thornthwaite (1948). Enamik PET-meetodeid põhinevad empiirilistel valemitel ja sisaldavad ühte või enam kliimatoloogilist tegurit. Potentsiaalse aurumise arvutamiseks on kasutusel kolm enim levinud arvutusmeetodit, milleks on Jensen-Haise (1963), Hargreavesi (1982) ja Penman-Monteithi (Shuttleworth, 1993) meetod.

Jensen-Haise meetodi korral kasutatakse potentsiaalse aurumise arvutamiseks keskmisi ööpäevaseid õhutemperatuure ja tegelikku lühilainekiirguse hulka. Jensen-Haise valem on esitatud järgmiselt (Jensen and Haise, 1963):

$$PET = \frac{R_a}{\lambda \rho} \frac{T_{mean}}{40} \quad (1-4)$$

R_a – atmosfääri lühilaineline kiirgus, MJ/m²/d;

T_{mean} – ööpäeva keskmine temperatuur, °C;

λ – varjatud aurumissoojus, MJ/kg;

ρ – vee tihedus, kg/m³.

Hargreavesi ja Samani valemis kasutatakse arvutustes ööpäevaseid miinimum- ja maksimumtemperatuure ning atmosfääri lühilainelist kiirgust. Hargreavesi ja Samani valem on järgmine (Hargreaves and Samani, 1985, 1982):

$$PET = (0,0023 \times R_a \times (T_{max} - T_{min})^{\frac{1}{2}} \times (T_{mean} + 17,8) \quad (1-5)$$

0,0023 – empiiriline koefitsient;

R_a – atmosfääri lühilaineline kiirgus, MJ/m²/d;

T_{max} – ööpäeva maksimumtemperatuur, °C;

T_{min} – ööpäeva miinimumtemperatuur, °C;

T_{mean} – ööpäeva keskmine temperatuur, °C.

Penmani meetod (1948) on välja töötatud potentsiaalse aurumise arvutamiseks avavees, mullas ja rohttaimedel ning põhineb energiabilansi ja aerodünaamiliste valemite kombinatsioonil. Täiendatud Penman-Monteithi valem (Monteith, 1965) võtab arvutustes arvesse varjatud aurumissoojust, netokiirgust, kiirgust pinnase soojendamiseks, psühromeetrilist konstanti, aururõhu kõvera langust, tuule kiirust ja küllastunud ning tegelikku aururõhku. Penman-Monteithi valem on järgmine:

$$PET = \frac{0,408 \times \Delta \times (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} \times u_2 \times (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34 \times u_2)} \quad (1-6)$$

R_n – netokiirgus, MJ/m²/d;

G – kiirgus pinnase soojendamiseks, MJ/m²/d;

T – keskmine ööpäevane temperatuur 2 m kõrgusel maapinnast, °C;

u_2 – tuule kiirus 2 m kõrgusel maapinnast, m/s;

e_s – küllastunud aururõhk, kPa;

e_a – tegelik aururõhk, kPa;

$e_s - e_a$ – empiirilised tegurid, kPa;

Δ – aururõhu kõvera lang, kPa/°C;

γ – psühromeetriline konstant, kPa/°C.

1.1.3 Transpiratsioon

Transpiratsioon on vee aurumine taimedelt, enamasti lehtede, aga ka varte ja õite pinnalt. Keskmiselt kaotavad taimed mullast omistatud vee hulgast transpiratsiooni kaudu 97–99,5% (Sinha, 2004). Transpiratsiooni mõjutavad kõige enam õhuniiskus, õhutemperatuur, tuule kiirus ja päikeseikiirus. Transpiratsioon on seda suurem, mida väiksem on suhteline õhuniiskus ja mida kõrgem on tuule ning päikeseikiirguse intensiivsus (Bauerle and Bowden, 2011).

1.1.4 Äravool

Äravooluks (*runoff*) nimetatakse seda osa sademetest, mis mööda maapinda ja läbi pinnase voolab veekogudesse. Äravoolu võib klassifitseerida vee veekogusse jõudmise ajahetke alusel otseäravooluks (*direct runoff, quickflow*) või baasäravooluks (*base runoff, baseflow*) ning päritolu põhjal pindmiseks äravooluks (*surface runoff*), tormi äravooluks (*subsurface storm runoff*) või põhjavee äravooluks (*groundwater runoff*) (Thompson et al., 2011).

Otseäravool on see osa äravoolust (vooluhulgast), mis jõuab veekogusse vahetult peale sadusid või lumesula. Otseäravooluks loetakse pindmise äravoolu, tormi äravoolu ja otse veekogu pinnale langevate sademete summat (Herrmann and Bucksch, 2014). Baasäravool on peamiselt põhjaveest pärinev äravool jões sademetevaesel perioodil (Gonfiantini et al., 1998).

Pindmise äravoolu korral jõuavad sademed veekogusse mööda maapinda (Bengtsson, 2011). Pindmine äravool jaguneb omakorda Hortoni (*Horton overland flow*) ja Dunne'i (*Dunnian runoff*) äravooluks. Hortoni äravool on küllastumata pindmine äravool, mis tekib, kui sademete ja lumesulavee kogus ületab pinnase infiltratsioonivõime antud ajahetkel (Horton, 1933). Pinnase üleküllastusest tingitud ehk Dunne'i äravool tekib aladel, kus põhjaveetase on maapinna lähedal. Sademete ja lumesulavee intensiivse lisandumise tõttu küllastub pinnas veega ja üleliigne vesi liigub mööda maapinda veekogusse (Zhenghui et al., 2003).

Tormi äravoolu on hüdroloogilises kirjanduses kirjeldatud ka kui vaheäravoolu (*interflow*), külgvoolu (*lateral flow*), maasisest äravoolu (*subsurface runoff*), mööduvat põhjavett (*transient groundwater*) ja mullavee äravoolu (*soil water flow*). Kirjanduse viited nii mullaveele kui ka põhjaveele seoses tormi äravooluga on tekitanud terminite definitsioonis segadusi. Kuigi mõningad uuringud on tõendanud tormi äravoolu kui küllastamata äravoolu küllastamata

tsoonis, siis enamus uuringutest näitab, et tormi äravool on küllastunud (või peaaegu küllastunud) äravool (Weiler et al., 2006).

Tormi äravool jagatakse enamasti omakorda kaheks homogeenseks maatriksäravooluks (*homogeneous matrix flow*) ja esmaseks (koheseks) äravooluks (*preferential flow*). Kui pinnase küllastunud või peaaegu küllastunud tsooni on ladestunud piisavas koguses vett, mis reageerib kiiresti sissetungiva vee toimet suurenevale hüdraulilisele gradiendile, tekib lateraalne maatriksäravool (Weiler et al., 2006). Kirjanduses on seda protsessi kirjeldatud ka ingliskeelsete terminitega *translatory flow* (Lischeid et al., 2002), *transmissivity feedback* (Rodhe, 1987) ja *soil-bedrock interface* (Tani, 1997).

1.2 Varasemad äravoolumäärangud Eestis

Eestis läbi viidud suuremamahulised äravoolukomponentide kvantitatiivsed uuringud jäävad perioodi 1932–1977 (Eipre, 1987; Protasjeva ja Eipre, 1972; Vallner ja Metslang, 1970).

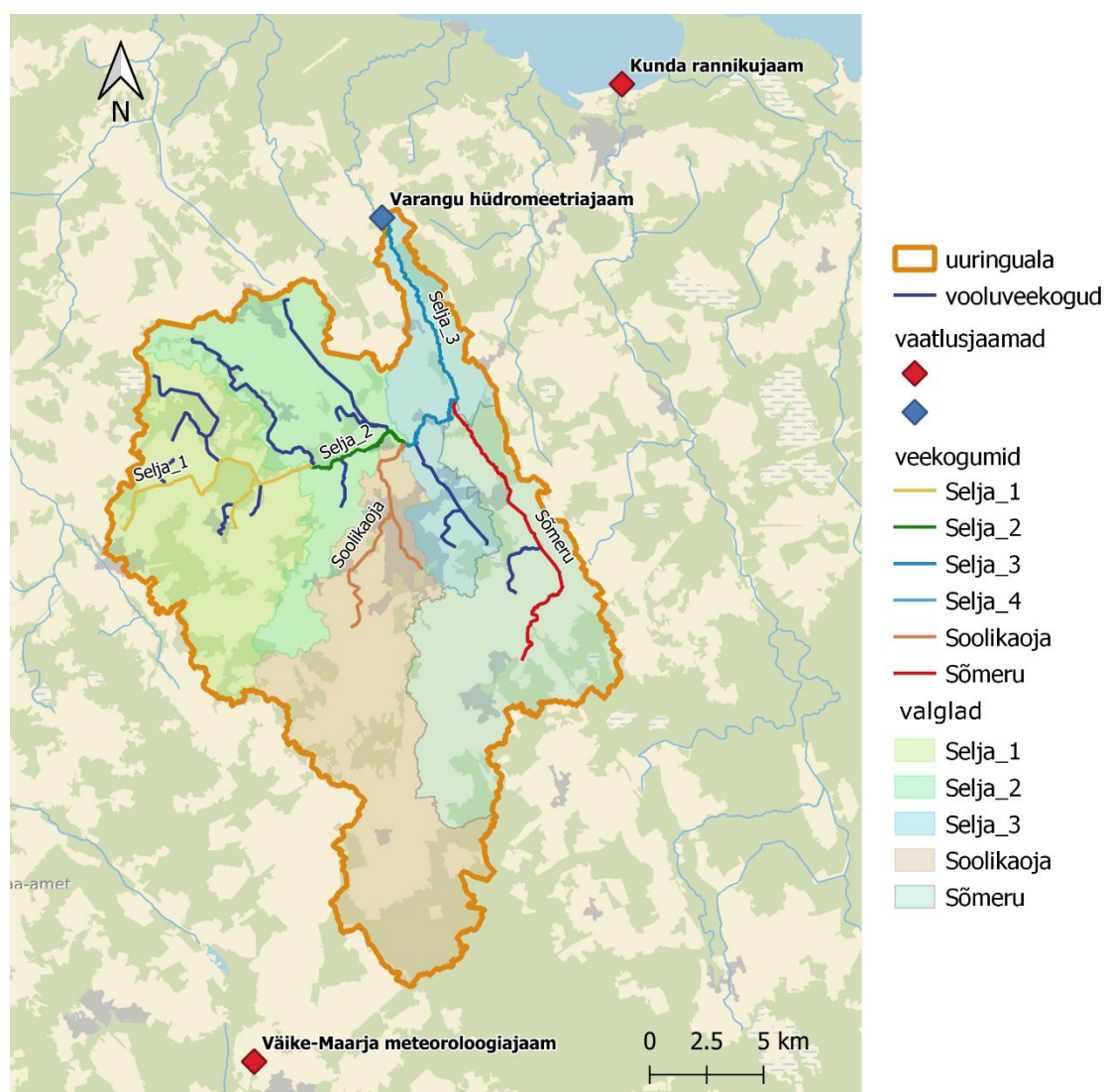
Pinna- ja põhjavee seoste uurimist (Protasjeva ja Eipre, 1972) alustati 1958. aastal kogu Eestit hõlmavate allikate toodangu ja miinimumäravoolude mõõtmisega. Mõõdetud miinimum- ja maksimumäravoolude ning allikate vooluhulkade alusel eraldati veebilansi komponendid – pindmine äravool, evapotranspiratsioon ja infiltratsioon –, mis omakorda jagati infiltratsiooniks, allikate (põhjavee) äravooluks ning sügavaks infiltratsiooniks.

Vallneri ja Metslangi (1970) poolt läbi viidud uurimuse raames selgitati välja Eesti põhjavete miinimumäravoolude kujunemise tingimused ja territoriaalne jaotumine. Töö käigus teostati kogu Eestit hõlmav miinimumäravoolude mõõtmine perioodil 1963–1970 ligikaudu 700 lävendis. Samuti kasutati sel hetkel kasutuses olnud hüdroloogiajaamades mõõdetavaid vooluhulki (ENSV Hüdrometeroloogia Valitsus). Jõgede miinimumäravoolude saamiseks kasutati 30-päeva-keskmise miinimumäravoolu meetodikat. 30-päeva-keskmise vooluhulga määramiseks koostatakse kõigi vaatlusaastate vooluhüdrograafid, leitakse neilt 30-päevased miinimumäravooluga lõigud, arvutatakse 30-päeva-keskmise vooluhulk ning seejärel kõigi 30-päeva-keskmiste keskmine väärtus (Maastik, 2006). Autorite väitel kajastab valminud kaart ka põhjavete miinimumäravoolu (Vallner ja Metslang, 1970).

Põhjalikumad uuringud Pandivere piirkonna veevarude kohta viidi läbi Eipre (1987) poolt, kes sai andmeid analüüsides Pandivere piirkonna põhjavee äravooluks 1,02–25,4 l/s km².

2. Uuringuala iseloomustus

Uuringuala jääb Põhja-Eestisse Lääne-Virumaa maakonda ja hõlmab Selja jõgikonda jäävaid alamvalglaid (joonis 1). Valgatega on seotud kuus pinnaveekogumit – Selja Veltsi ojani (1074600_1), Selja Veltsi ojaast Soolikaojani (1074600_2), Selja Soolikaojast Varangu mnt sillani (1074600_3), Selja Varangu mnt sillast suudmeni (1074600_4), Soolikaoja (1075300_1) ja Sõmeru (1075600_1). Selja jõe pikkus on 47,7 km ja pinnaveevalgla pindala 422,6 km² ning Sõmeru jõe pikkus 16,3 km ja pinnaveevalgla pindala 65,9 km² (EELIS, 2020). Antud vooluveekogumid kuuluvad Ida-Eesti vesikonna alamvesikonda ja on seotud põhjaveekogumiga nr 15 (Siluri-Ordoviitsiumi põhjaveekogum Ida-Eesti vesikonnas) (Marandi jt, 2020; Terasmaa jt, 2015).



Joonis 1. Uuringuala paiknemine ja Selja jõe alamvalglad ning veekogude kogumid. Aluskaart: Maa-amet

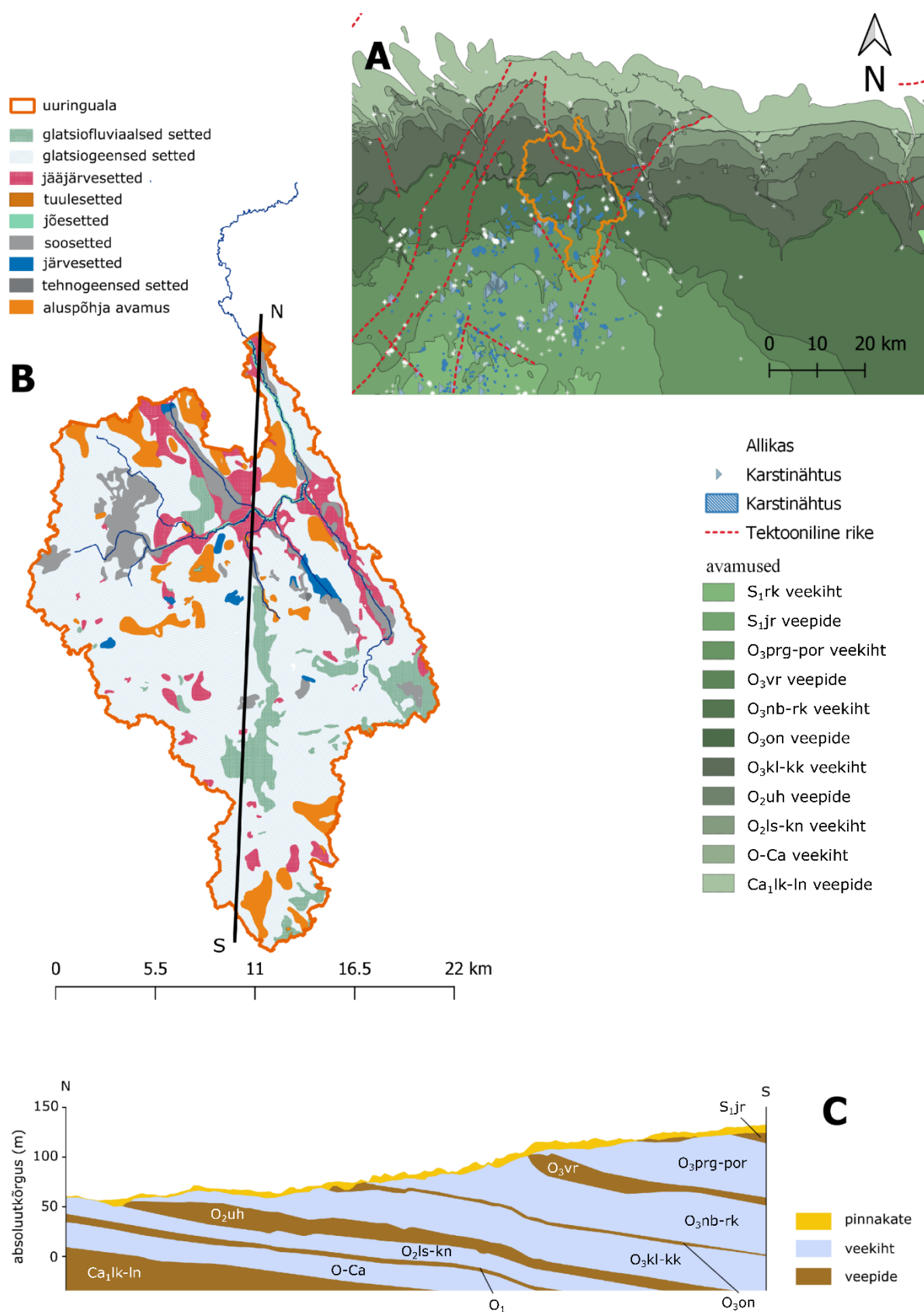
Uuringuala pinnakatte moodustavad glatsiogeensed (moreen), jääjärvelised (liivad, aleuriit, savi) ja glatsiofluviaalsed (liiv, kruus) setted ning väiksemal määral soo-, järve- ning jõesetted (joonis 2). Õhukese pinnakattega alad (1–10 m) esinevad uuringuala põhja- ja lõunaosas moreentasandikel, moodustades uuringualast 7%. Suuremad pinnakatte paksused (kuni 20 m) esinevad uuringuala põhja- ja idaosasse jäävates Selja ja Haljala mattunud orgudes. (Suuroja jt, 2015, 2006, 2005)

Geoloogiliselt paikneb ala Siluri ja Ordoviitsiumi ladestute avamustel. Uuringualal avanevad lõunast põhja suunas Siluri ladestu Llandovery ladestiku Juuru lade, Ordoviitsiumi ladestu Ülem-Ordoviitsiumi ladestiku Pirgu, Vormsi, Nabala, Rakvere, Oandu, Keila, Haljala ja Kukruse lademe ning Kesk-Ordoviitsiumi Uhaku ja Lasnamäe lademe lubjakivid (Suuroja jt, 2015, 2006, 2005). Geoloogilises läbilõikes vahelduvad alal nõrgalt savikad lubjakivid (Pirgu, Nabala, Rakvere) savikamate lubjakivide (Vormsi, Keila, Haljala ja Uhaku) ning merglitega (Oandu lade) (Suuroja jt, 2015, 2006, 2005). Varasemate uuringute alusel loetakse ka uuringualal esinev kukersiidi vahekihtidega Kukruse lademe lubjakivi vettandvaks kihiks (Perens jt, 1978). Uuringualal esinevad seega Pirgu-Porkuni (O₃prg-por), Nabala-Rakvere (O₃nb-rk) ja Keila-Kukruse (O₂kl-kk) veekihid, mida eraldavad Juuru (S₁jr), Vormsi (O₃vr), Oandu (O₃on), Uhaku (O₂uh) veepidemed (tabel 1, joonis 2).

Uuringuala asetseb Pandivere kõrgustiku piirkonnas, mida loetakse Eesti kõige suuremaks ja Ida-Euroopa üheks suurimaks karstialaks (Maastik, 1993; Raukas ja Teedumäe, 1997). Karsti kujunemist soosib kõrgustiku veelahkmeline asend, õhuke pinnakate, suur suhteline kõrgus võrreldes ümbritsevate aladega, ulatuslik aeratsioonivöö, lõhelised aluspõhjakivimid ja lõhevööndite rohkus (Maastik, 1993). Uuringuala lõunaosas esinevad ulatuslikematest karstivormidest Pajusti, Vandu, Kada-Vaedla ja Levila karstiväljad ning Jupri karstiorg (Suuroja jt, 2015, 2006). Samuti jääb uuringuala lõunapoolne osa Pandivere ja Adavere nitraaditundlikule alale. Nitraaditundlikuks alaks loetakse kaitsmata põhjaveega pae- ja karstialad pinnakatte paksusega kuni 2 meetrit (Pandivere..., 2003).

Tabel 1. Uuringuala stratigraafiline ja hüdrostratigraafiline skeem (Suuroja jt, 2006, 2005)

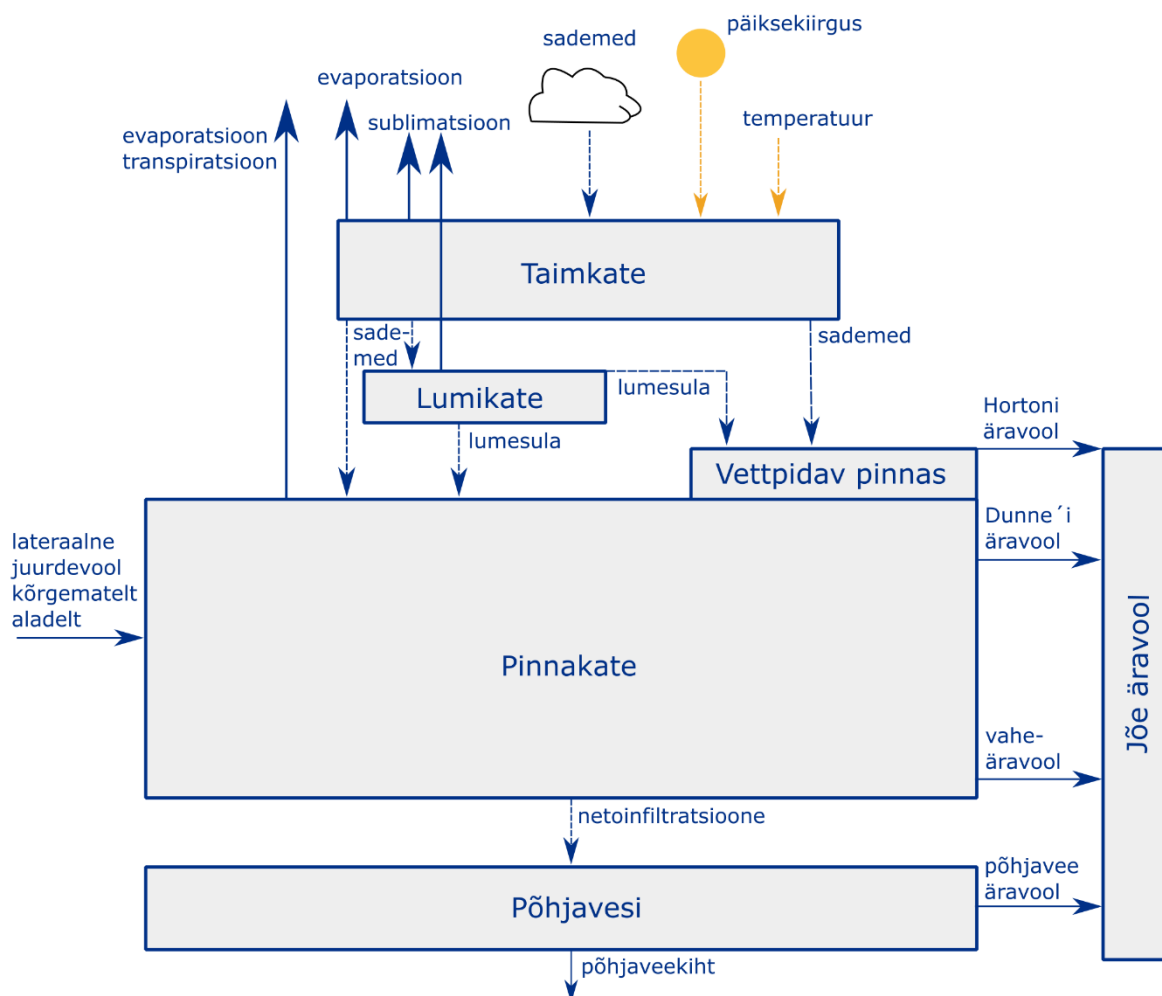
Ladestu	Ladestik	Lade	Põhjaveekompleks		Veekiht	Veepide	Põhjaveekogum	
Kvaternaar	Holotseen		Kvaternaari (Q)		soosetted (bIV)		Kvaternaari-Siluri-Ordoviitsiumi Pandivere Ida-Eesti (nr 15)	
					jõesetted (aIV)			
					järvesetted (IIIV)			
					järvesetted (IIIV)			
	Ülem-Pleistotseen				jääjärve setted (lgIIIjr ₃)			
						jääjärve setted (lgIIIjr ₃)		
					glatsiofluviaalsesed setted (fIIIjr ₃)			
					glatsiogeensed (moreen) setted (gIIIjr ₃)			
						glatsiogeensed (moreen) setted (gIIIjr ₃)		
						Juuru (S _I jr)		
Silur		Llandovery	Juuru	Siluri (S)				
Ordoviitsium	Ülem-Ordoviitsium	Porkuni	Siluri-Ordoviitsiumi (S-O)	Ordoviitsiumi (O)	Pirgu-Porkuni (O ₃ prg-pir)			
		Pirgu				Vormsi (O ₃ vr)		
		Vormsi						
		Nabala			Nabala-Rakvere (O ₃ nb-rk)			
		Rakvere				Oandu (O ₃ on)		
		Oandu						
		Keila			Keila-Kukruse (O ₃ kl-kk)			
		Haljala						
		Kukruse				Uhaku (O ₂ uh)		
		Kesk-Ordoviitsium			Uhaku			
	Lasnamäe							
	Aseri			Lasnamäe-Kunda (O ₂ ls-kn)				
	Kunda							
	Volhovi							
	Alam-Ordoviitsium		Billingeni			Ordoviitsiumi (O ₁)		
		Hunneberg						
		Varangu						
		Pakerordi						
	Kambrium	Furgong	Dominopol	Ordoviitsiumi-Kambriumi (O-Ca)		Ordoviitsiumi-Kambriumi (O-Ca)		Ordoviitsiumi-Kambriumi Ida-Eesti (nr 5)
		Ladestik 2						
		Terre-Neuve				Lükati-Lontova (Ca ₁ lk-ln)		



Joonis 2. A – Uuringuala paiknemine Eesti kaardil. B – Pinnakatte setete jaotumine uuringualal. C – uuringuala hüdrogeoloogiline läbilõige, loodud Polikarpuse (2019) töö raames valminud rasterpindade alusel

3. Programmpakett PRMS

Pinnavee äravoolukomponentide mudeldamiskompleks PRMS on deterministlik, osatulevistega diferentsiaalvõrrandite integreeritud lahenditele tuginev matemaatiliste mudelite süsteem. Selle abil saab kvantitatiivselt hinnata käesoleva uurimuse osas „Teoreetilised alused“ kirjeldatud hüdroloogiliste protsesside tulemusi mitmesuguste kliima- ja maakasutussituatsioonide puhul (Markstrom et al., 2015b). Nende protsesside vastastikust seostatust mudelis näitlikustab joonis 3.



Joonis 3. Pinnavee äravoolu kujundavate protsesside seostatus mudelis PRSM (Markstrom jt, 2015b järgi)

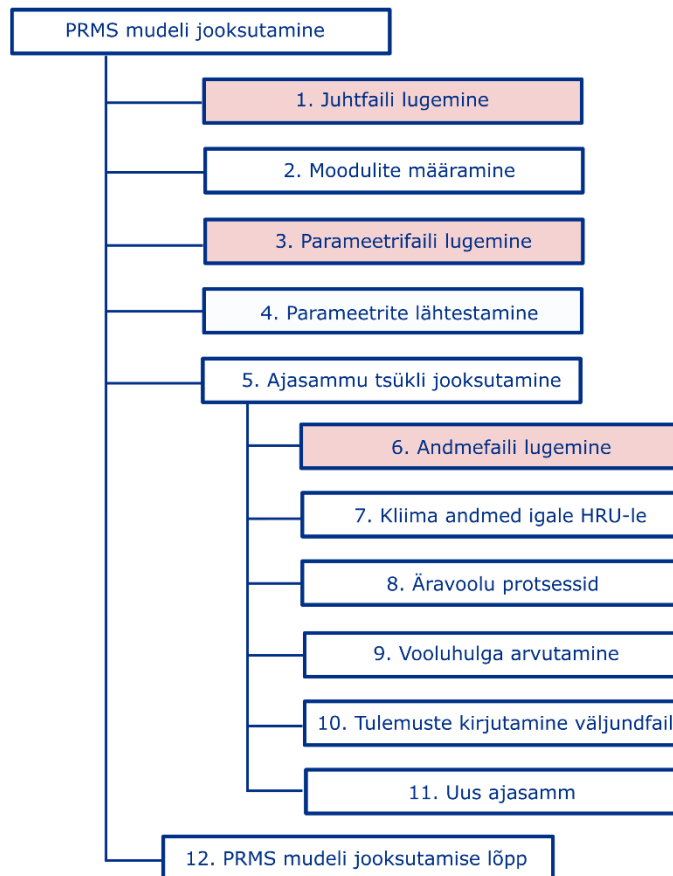
PRMS on jaotatud mooduliteks, mis võimaldab neid koos juurdekuuluvate parameetritega kasutada vastavalt mudeldamisvajadustele. PRMS-i mudeliala jaotatakse hüdroloogilisteks arvutusüksusteks (*Hydrologic Response Units* – HRU, põhjavee korral *Groundwater Reservoir* – GWR), mis toimivad veereservuaaride võrgustikuna. Iga HRU omadused

defineeritakse PRMS parameetritega, mis kirjeldavad HRU-de füüsikalisi omadusi ja PRMS-i mudeli arvutamiseks kasutatavaid koefitsiente. Parameetritena kirjeldatakse näiteks maapinna kõrgust, kallakusnurka, kallakussuunda, mullastiku, pinnakatte, taimkatte, evaporatsiooni ja lumikatte omadusi ning vooluvõrku.

Kliimaatilised tegurid (ööpäeva maksimaalne ja minimaalne õhutemperatuur, sademed, päikesepaiste kestus) ning jõe vooluhulgad on täpsustatud andmete failis. Juhtfailis on määratud simulatsiooniparameetrid ja väljundfailide andmed. Mudeli töö käigus kogutakse ja hoiustatakse piltlikult öeldes igasse veereservuaari vett, et arvutada nii pinna- kui ka põhjavee äravool, evaporatsioon ja transpiratsioon.

PRMS mudeli töövoog koosneb kaheteistkümnest etapist (joonis 4, Markstrom et al., 2015b):

1. Loetakse sisse juhtfail, kus on määratud mudeli „aktiveeritud“ moodulid, sisend- ja väljundfailide nimed, asukohad ning mudeli algus- ja lõppkuupäev.
2. Aktiivsete moodulite poolt määratakse mudelisse loetavad parameetrid ja muutujad.
3. Loetakse sisse parameetrifail, kus on kirjeldatud iga HRU füüsikalisi omadusi ja PRMS-i mudeli arvutamiseks kasutatavaid koefitsiente.
4. Aktiveeritud moodulite muutujad lähtestatakse ja kontrollitakse parameetrite väärtuste vastavust mudelis parameetritele määratud vahemikele.
5. Aktiveeritakse ajasammu tsükkel.
6. Loetakse sisse andmefail, mis sisaldab iga ajasammu kohta mõõdetud sademete, õhutemperatuuri, lumikatte paksuse ja vooluhulga väärtusi.
7. Käivitatakse kõik aktiivsed moodulid, mis omistavad või arvutavad igale HRU-le kliimaatilised andmed.
8. Arvutatakse igale HRU-le taim- ja lumikatte parameetrid ning pindmise äravoolu hulga. Samuti genereeritakse maasisesed veevahetuse protsessid.
9. Arvutatakse vooluhulgad vooluveekogudes.
10. Kui antud ajasammu jaoks vajalikud arvutused on lõpule viidud, kirjutatakse tulemused väljundfaili.
11. Loetakse sisse järgmise ajasammu sisendandmed ja korratakse etappe 6–10.
12. Kõik tulemused kirjutatakse väljundfailidesse ja mudeli jooksumine lõpetatakse.



Joonis 4. PRMS mudeli töövoog etapid (Markstrom et al., 2015b järgi)

3.1 Pindmine äravool (*surface runoff*)

Pindmine äravool arvutatakse sademete infiltratsiooni ja pinnase küllastuse ülejäägina. PRMS mudeli puhul jaguneb pindmine äravool kaheks. Hortoni valemi (hru_sroffi) põhjal arvutatud küllastumata pindmine äravool tekib, kui sademete ja lumesulavee kogus ületab pinnase infiltratsioonivõime antud ajahetkel. Pinnase infiltratsioonivõimet mõjutavad pinnase maksimaalne veemahutavus ja infiltratsioonivõime. Küllastumata pindmine äravool tekib enamasti linnapiirkondades, kus infrastruktuur (asfalteeritud teed, parklad jms) takistavad vee imbumist pinnasesse (Markstrom et al., 2015b).

$$avail_water = imperv_stor_{HRU}^{t-1} + net_rain_{HRU} + snowmelt_{HRU} \quad (3-1)$$

$$hru_sroffi_{HRU} = (avail_water - imperv_stor_max_{HRU}) \times hru_precent_imperv_{HRU} \quad (3-2)$$

$avail_water$ – kättesaadav vesi, toll (in);

$imperv_stor$ – varasemal ajahetkel maapinda infiltreerunud vee kogus, in;

net_rain – summaarne sademete kogus, in;
snowmelt – lumesulavee kogus, in;
hru_sroffi – Hortoni äravool, in;
imperv_stor_max – pinnase maksimaalne infiltratsioonivõime, in;
hru_precent_imperv – maapinna veeläbilaskvuse protsent HRU kohta.

Pinnase üleküllastusest tingitud ehk Dunne'i äravool (*dunnian_flow*) tekib aladel, kus põhjaveetase on maapinna lähedal. Sademete ja lumesulavee intensiivse lisandumise tõttu küllastub pinnas veega ja üleliigne vesi liigub mööda maapinda veekogusse (Markstrom et al., 2015b).

$$dunnian_pfr_{HRU} = MAX(0, pref_flow_maxin_{HRU} - pref_flow_max_{HRU}) \quad (3-3)$$

$$dunnian_gvr_{HRU} = MAX(0, fast_stor_{HRU} + pref_flow_maxin_{HRU} - pref_flow_max_{HRU}) \quad (3-4)$$

$$dunnian_flow_{HRU} = dunnian_pfr + dunnian_gvr \quad (3-5)$$

dunnian_pfr – esmase äravoolu reservuaarist pärit Dunne'i äravool, in;
pref_flow_maxin – maksimaalne infiltreerumisvõime esmases äravoolu reservuaaris, in;
pref_flow_max – maksimaalne veemahutavus esmases äravoolu reservuaaris, in;
dunnian_gvr – gravitatsioonivee reservuaarist pärit Dunne'i äravool, in;
fast_stor – esmase äravoolu reservuaari veemahutavus, in;
dunnian_flow – Dunne'i äravool, in.

3.2 Maasisene ehk vaheäravool (*subsurface flow; interflow*)

Aeratsioonivöös eristatakse keemiliselt ja füüsiliselt seotud vett, veeauru ning vaba vett. Viimane jaotub omakorda kapillaarveeks ja gravitatsiooniveeks, mis liigub raskusjõu mõjul (Astover jt, 2012).

PRMS mudelis jaotatakse pinnakatte kiht esmase äravoolu, kapillaar- ja gravitatsioonivee reservuaarideks. Antud kihid ei ole füüsilised, vaid arvestavad pinnase läbilõikes esinevaid veesisalduse erinevusi erinevatel küllastustasemetel. Kõigile kolmele reservuaarile omistatakse maksimaalsed veemahutavuse parameetrid ja neis esinevad füüsikalised protsessid (evaporatsioon, transpiratsioon, äravoolude jaotumine) (Markstrom et al., 2015b).

Kapillaarvee reservuaar tähistab väliveemahutavuse (suurim seotud ja rippuva kapillaarvee hulk, mida pinnas suudab kinni hoida) ja taimede närbumisniiskuse (pinnase veesisaldus, millest väiksema vee hulga korral ei suuda taimed enam vett omastada) vahet ehk aktiivveemahutavust iga HRU kohta. Aktiivveemahutavus iseloomustab taimede poolt omastatava vee hulka, mida pinnas suudab peale lume sulamist või rohkeid sademeid kinni hoida (Markstrom et al., 2015b). Maksimaalne kapillaarvee hulk reservuaaris on määratud parameetriga *soil_moist_max*.

$$soil_moist_max_{HRU} = soil_root_max_{HRU} \times awc \quad (3-6)$$

$$soil_root_max_{HRU} = MAX(soil_depth_{HRU}, root_depth_{HRU}) \quad (3-7)$$

soil_moist_max – maksimaalne pinnakatte paksus, in;

soil_root_max – maksimaalne taimejuurte sügavus, in;

awc – aktiivveemahutavus;

soil_depth – pinnakatte paksus, in;

root_depth – taimejuurte sügavus, in.

Kapillaarvesi ei liigu vooluvõrku, vaid allub ainult evaporatsioonile ja transpiratsioonile (Markstrom et al., 2015b). Kapillaarvesi võib pinnases olla toetuv või rippuv. Pinnases raskesti liikuv rippuv kapillaarvesi tekib peale sadusid ja juurdevooluna pinnaveest (Astover jt, 2012). Rippuv kapillaarvee reservuaar sisaldab vett, mille maksimaalne kogus on määratud parameetriga *soil_rechr_max*. See vesi on kättesaadav evapotranspiratsiooniks (Markstrom et al., 2015b).

$$soil_rechr_max = 18 \times awc \quad (soil_root_max > 18) \quad (3-8)$$

$$soil_rechr_max = soil_root_max \times awc \quad (soil_root_max < 18) \quad (3-9)$$

soil_rechr_max – maksimaalne rippuva kapillaarvee reservuaari veemahtuvus, in;

soil_root_max – maksimaalne taimejuurte sügavus, in;

awc – aktiivveemahutavus.

Toetuvaks kapillaarveeks nimetatakse kapillaarvett, mis tõuseb kapillaarjõudude mõjul põhjaveetasemest ülespoole. Toetuv kapillaarvesi on pinnases kergesti liikuv (Astover jt, 2012). Toetuva kapillaarvee reservuaari jõuab vesi, kui küllastustase ületab kapillaarvee reservuaaris rippuva kapillaarvee reservuaari maksimaalse koguse. Maksimaalne veekogus antud tsoonis on

maksimaalse kapillaarvee ja rippuva kapillaarvee hulga vahe. Toetuv kapillaarvesi on kättesaadav ainult transpiratsiooniks (Markstrom et al., 2015b).

Suurtes mittekapillaarsetes poorides sisaldub raskusjõu mõjul liikuv gravitatsioonivesi, mis jaotub nõrguvaks ja toetuvaks (Astover jt, 2012). PRMS mudeli nii esmase äravoolu kui ka gravitatsioonivee reservuaaris olev vesi allub raskusjõule. Esmase äravoolu tsoonis olev nõrguv gravitatsioonivesi, mis tekib peale kestvaid sademeid ja lume sulamist ning on lühiajaline, on kättesaadav Hortoni ja Dunne'i äravooluks (vt ptk 3.1) ning kiireks maasiseseks äravooluks. Kiire maasisene äravool *fast_flow* on lateraalne vee liikumine pinnakihis olevates lõhedes ja poorides (Markstrom et al., 2015b).

$$fast_flow_{HRU} = (fastcoef_lin \times pref2_stor_{HRU}) + [fastcoef_sq \times (pref2_stor_{HRU})^2] \quad (3-10)$$

$$pref_flow_stor_{HRU} = pref2_stor_{HRU} - fast_flow_{HRU} \quad (3-11)$$

fast_flow – kiire maasisene äravool, in;

fastcoef_lin – lineaarne kiire maasisese äravoolu koefitsient;

pref2_stor – vee hulk, mis liigub esmase äravoolu reservuaari, in;

fastcoef_sq – mittelineaarne kiire maasisese äravoolu koefitsient;

pref_flow_stor – esmase äravoolu veemahtuvus, in.

Nõrguvast veest moodustub vettpidavale või vett halvasti juhtivale kihile toetuv gravitatsioonivesi. Toetuv gravitatsioonivesi on kas ajuti esinev ülavesi või küllastusvööndisse kuuluv põhjavesi (Astover jt, 2012). Gravitatsioonivee vööndis olev toetuv gravitatsioonivesi on samuti kättesaadav Dunne'i äravooluks. Sealne vesi võib aga liikuda edasi ka põhjavee reservuaari *ssr_to_gw* või tagasi esmase äravoolu tsooni *pref_flow_stor*. Samuti on osa sealsest veest kättesaadav aeglaseks maasiseseks äravooluks. Aeglane maasisene äravool *slow_flow* on lateraalne äravool vooluveekogusse (Markstrom et al., 2015b).

$$ssr_to_gw_{HRU} = ssr2gw_rate_{HRU} \times (grav2_stor_{HRU})^{ssr2gw_exp_{HRU}} \quad (3-12)$$

$$slow_flow_{HRU} = (slowcoef_lin \times grav_stor_{HRU}) + [slowcoef_sq \times (grav_stor_{HRU})^2] \quad (3-13)$$

ssr_to_gw – vee hulk, mis liigub gravitatsioonivee reservuaarist GWR-i, in;

ssr2gw_rate – lineaarne koefitsient vee liikumiseks gravitatsioonivee reservuaarist GWR-i;

grav2_stor – vee hulk, mis liigub gravitatsioonivee reservuaari, in;

ssr2gw_exp – mittelineaarne koefitsient vee liikumiseks gravitatsioonivee reservuaarist GWR-i;

slow_flow – aeglane maasisene äravool, in;

slowcoef_lin – lineaarne aeglase maasisese äravoolu koefitsient;

slowcoef_sq – mittelineaarne aeglase maasisese äravoolu koefitsient;

grav_stor – gravitatsioonivee reservuaari veemahtuvus, in.

3.3 Põhjavee äravool (*groundwater flow*)

Põhjavett kujutatakse PRMS mudelis kui lineaarset veereservuaari ja eeldatakse, et kogu baasäravool pärineb põhjaveest. Algne veekogus igas põhjavee reservuaaris määratakse parameetriga enne mudeli käivitamist. Summaarne sissevool *gwres_in* igasse GWR-i arvutatakse lähtudes liigsest pinnases asetsevast veest *soil_to_gw*, põhjavette jõudvast gravitatsiooniveest, sissevoolust kõrval asetsevatest GWR-dest ja maapinna nõgudesse koguneva vee *dprst_seep_hru* infiltratsioonist. Väljavool põhjavee reservuaarist toimub kõrval asuvasse GWR-i või baasäravooluna vooluveekogusse (Markstrom et al., 2015b).

$$\begin{aligned} gwres_in_{GWR} = & soil_to_gw_{GWR} + ssr_to_gw_{GWR} + gw_upslope_{GWR} + \\ & + gw_dprst_seep_{GWR} \end{aligned} \quad (3-14)$$

$$soil_to_gw_{Hru} = MIN(cap_excess_{Hru}, soil2gw_max_{Hru}) \quad (3-15)$$

$$\begin{aligned} dprst_seep_hru = & \\ = & \frac{dprst_vol_open_{Hru} \times dprst_seep_rate_open_{Hru}}{hru_area_{Hru}} \\ + & \frac{dprst_vol_clos_{Hru} \times dprst_seep_rate_clos_{Hru}}{hru_area_{Hru}} \end{aligned} \quad (3-16)$$

gwres_in – summaarne vee maht, mis liigub gravitatsiooni- ja kapillaarvee reservuaarist GWR-i, in;

soil_to_gw – vee hulk, mis liigub kapillaarvee reservuaarist GWR-i, in;

ssr_to_gw – vee hulk, mis liigub gravitatsioonivee reservuaarist GWR-i, in;

gw_upslope – põhjavee juurdevool kõrgematelt aladelt, in;

gw_dprst_seep – vee hulk, mis liigub pinnanõost GWR-i, in;

cap_excess – liigne juurdevool kapillaarvee reservuaari, in;

soil2gw_max – maksimaalne vee hulk, mis suunatakse otse kapillaarvee reservuaarist GWR-i, in;

dprst_seep_hru – vee hulk, mis koguneb pinnanõosse, in;

dprst_vol_open – veemahutavus avatud pinnanõos, in;

dprst_seep_rate_open – avatud pinnanõo koefitsient;

dprst_vol_clos – veemahutavus suletud pinnanõos, in;

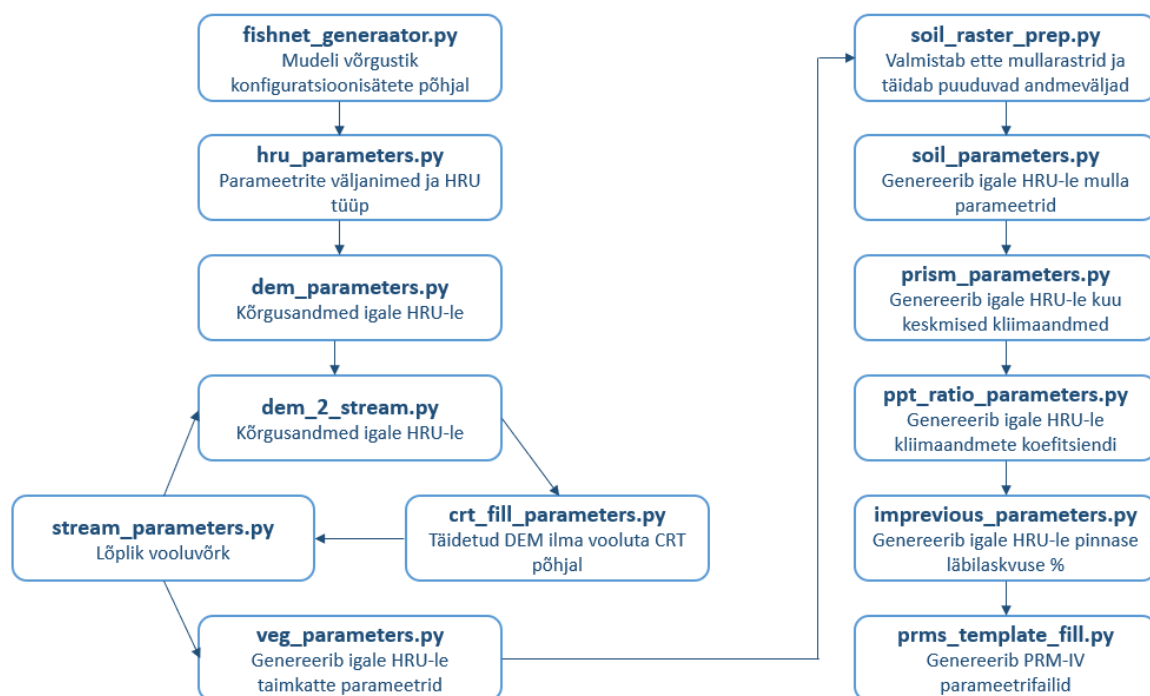
dprst_seep_rate_clos – suletud pinnanõo koefitsient;

hru_area – HRU pindala, aaker (ac).

4. Andmed ja metoodika

4.1 Rajatingimused

Algandmete põhjal PRMS parameetrifailide loomiseks kasutati Gsflow-Arcpy Pythoni skriptikogumit (Gardner et al., 2018). Antud skriptikogum koosneb kolmeteistkümnest skripti- ja konfiguratsioonisätete failist (joonis 5). Skriptidega genereeriti algandmete kihtidest (tabel 2) vektorfail, mis sisaldab andmeid iga HRU kohta. Skriptikomplekt loob sisendandmekogumid PRMS moodulitele *precip_1sta*, *precip_laps*, *temp_1sta*, *temp_laps*, *ddsolrad*, *potet_jh*, *srunoff_smidx* ja *strmflow*.



Joonis 5. Gsflow-Arcpy Pythoni töövoog (Gardner et al., 2018 järgi)

Alljärgnevatel peatükkides on lahti seletatud PRMS mudeli rajatingimuste loomine kaheksale eelnimetatud moodulile Gsflow-Arcpy Pythoni abil. Mudeli toimimiseks on vajalikud lisamoodulid, mille parameetrid ja kirjed loodi käsitsi. Kõik antud mudelis kasutatud moodulid ja nende selgitused on esitatud peatükis „Tulemused ja arutelu“ tabelis 6.

Tabel 2. Gsfow-Arcpy Pythoni jooksutamiseks vajalikud lähteandmed ja nende allikad

Sisend	Andmeallikas
Uuringuala ja alamvalglad	Keskkonnaagentuuri andmebaasi vooluvee-kogumite valgate andmekiht (EELIS 2020)
Maapinna kõrgusandmed, kallakusnurk, -suund	LiDAR-andmete DEM (Maa-amet 2020)
Maakatvuse tüüp	Eesti topograafia andmekogu (Maa-amet 2020)
Pinnase läbilaskvuse protsent	Eesti topograafia andmekogu (Maa-amet 2020)
Pinnakatte paksus	Geoloogilise baaskaardi 1:50 000 objektiklass QP_Isojoon (Maa-amet 2020)
Filtratsioonikoefitsient	Geoloogilise baaskaardi 1:50 000 objektiklass Q (Maa-amet 2020), kaardilehtede seletuskirjad
Liiva-, savi- ja aleuriidifraktsiooni protsentuaalne jaotumine	Mullastiku kaart (Maa-amet 2020)
Ööpäeva keskmised õhutemperatuurid (maksimum, miinimum), sademed, vooluhulk	Excel-failid (EELIS 2021)
Aktiivveemahutavus (OVD)	Astover jt, 2012

4.1.1 Mudeli võrk

Fishnet_generator.py skript katab ArcPy funktsioone kasutades uuringuala ortogonaalse HRU-dele vastava virtuaalse arvutusvõrguga, lähtudes uuringuala ulatusest ja konfiguratsioonifailis määratud ruudustiku suurusest ning puhvri ulatusest. Selja jõe valgla uuringuala HRU suurus on 200 x 200 m, mis valiti lähtudes olemasolevate andmete tihedusest. Uuringuala piiritlemiseks kasutati Keskkonnaagentuuri ruumiandmete vooluveekogumite valgate vektorfaili Selja jõe valgla piiri (EELIS, 2020).

HRU parameetrite skript (*hru_parameters.py*) loob vektorfaili, mis sisaldab kõiki parameetrite välju. Parameetrite väljad täidetakse järgmisi skripte jooksutades. Antud skript määrab ka HRU tüübi (0 = mitteaktiivne, 1 = aktiivne, 2 = järv, 3 = nõgu). Mitteaktiivseks HRU tüübiks loetakse uuringualast pindalaliselt rohkem kui 50% võrra väljapool asetsevad ruudud. Ülejäänud ruudud määratakse aktiivseteks või järve tüüpideks. HRU tüüp nimetatakse järveks, kui järve polügoon moodustab üle 40% ruudu pindalast.

Sisendfailiks on vaja luua vektorfail järve polügoonidega. Selleks kasutati Maa-ameti topoloogilise andmekogu objektiklassi siseveekogud (2020), millest filtreeriti välja järved, paisjärved ja tehisjärved. Samuti loodi sisendfail, mis sisaldab uuringualal paiknevaid

väljavoolupunkte ja alamvalglaid (EELIS, 2020). Selja jõe valgla uuringualal märgiti väljavoolu asukohaks Varangu hüdroloogiajaama asukoht.

Analüüsi tulemusena ei jäänud uuringualale ühtegi piisavalt suure pindalaga järve, mille tulemusel oleks uuringuala HRU tüüp määratud järveks.

4.1.2 Kõrgusmudel

Kõrgusmudeli skript (*dem_parameters.py*) täidab kõrgusparameetrite väljad, võttes arvesse sisendfailina määratud kõrgusmudelit (DEM). Kui algne DEM on väiksema piksli suurusega kui loodava uuringuala ruudu suurus, arvutab skript uuringuala iga HRU kohta maksimaalse, minimaalse ja keskmise DEM-i väärtuse. Samuti jooksub skript Arc Hydro voo akumulatsioon (*flow accumulation*) tööriista, et leida kaalutud sissevool HRU-sse. See on vajalik vooluvõrgu ja äravoolukomponentide järjestatud liikumistee leidmiseks.

Algne kõrgusmudel on loodud Maa-ameti LiDAR kõrgusrastri (2020) alusel. Algne DEM teisendati ümber ERDAS pildi vormingusse (*.img*) piksli tüübiga 32 *bit float* (Arcgis Pro; tööriist *export raster*).

4.1.3 Vooluvõrk

Vooluvõrgu skriptid (*crt_fill_parameters.py*, *stream_parameters.py*) arvutavad vooluvõrgu varem loodud DEM-i alusel, mis tagab vooluvõrgu õige paiknemise. Algse vooluvõrgu loomiseks jooksub skript Arc Hydro voolu suuna (*flow direction*) ja akumulatsiooni (*flow accumulation*) tööriistu. Vooluvõrgu genereerimisel võetakse arvesse voolu akumulatsioonikünnist ja voolu maksimaalset pikkust, mis määratakse konfiguratsioonifailis. Selja jõe valgla mudeli puhul on antud väärtusteks vastavalt 200 m ja 50 m, mis saadi parameetrite järjestikusel katsetamisel ning genereeritud vooluvõrkude võrdlemisel ETAK jõe ja kraavi nähtusklassidega (ETAK 2020).

Seejärel jooksub Cascade Routing Tool-i (CRT) (Henson et al., 2013), mis on samuti USA Geoloogiateenistuse programm vooluvõrkude loomiseks. Igale HRU-le omistatakse selle käigus lõplik äravoolukomponentide liikumistee järjestus ning voolu(võrgu) suund, ulatus, pikkus ja kalle.

4.1.4 Taimkate

Taimkatte skript (*veg_parameters.py*) genereerib mudeldamisala katvuse tüübi (0 = taimkatteta ala, 1 = rohumaa, 2 = põõsastik, 3 = lehtpuud, 4 = okaspuud), talvise ja suvise taimekatte katvuse protsendi, talvise ja suvise sademete maapinnale jõudmise protsendi ning taimejuure sügavuse parameetrid. Taimkatte katvuse tüübi väärtuste ülekandmiseks kasutati Eesti topograafia andmekogu (ETAK, 2020). Näiteks vastab ETAK-i nähtusobjekti väärtus 301100 (karjäär) PRMS taimkatte tüübile 0 (taimkatteta maa).

ETAK-i andmete alusel sisendfaili loomiseks tuli esmalt üksikud vektorfailid liita ning omistada igale nähtusklassi märgendile unikaalne ID, milleks liideti nähtusklassi kood ja märgendi väärtus. Unikaalse ID alusel loodi vektorfailist rasterfail. Seejärel loodi rastrile atribuutide tabel (ArcGis Pro; *build raster attribute table*). ETAK-i väärtuste ja PRMS taimkatte tüüpide vastavused loodi väärtuste ümber teisaldamiseks mõeldud tekstifailides.

4.1.5 Pinnakate

Pinnakatte parameetrite arvutamiseks (*soil_raster_prep.py*, *soil_parameters.py*) on vaja mudelisse sisestada omastatava vee diapasoon (OVD) ehk aktiivveemahutavus, pinnakatte filtratsioonikoefitsiendi ja pinnakatte paksuse väärtused ning savi, liiva ja aleuriidi lõimise protsentuaalne jaotumus.

OVD jääb uuringualal vahemikku 190–214 mm (Astover jt, 2012). Sisendfail loodi „Mullateaduse“ õpikus (Astover jt, 2012) esitatud OVD väärtuste joonise järgi, omistades igale Eesti vallale (ETAK, 2020) joonisel näidatud keskmise väärtuse. Seejärel loodi vektorfailist rasterfail.

Pinnakatte filtratsioonikoefitsiendi väärtused saadi Maa-ameti geoloogilise baaskaardi 1:50 000 seletuskirjadest (tabel 3) (Suuroja jt, 2015, 2006, 2005). Filtratsioonikoefitsiendid omistati Maa-ameti geoloogilise baaskaardi 1:50 000 (2020) ruumikogu objektiklassile pinnakate vastavalt stratigraafilisele indeksile ja objekti litoloogiale. Seejärel loodi filtratsioonikoefitsiendi väärtuse alusel vektorfailist rasterfail.

Pinnakatte paksuse rasterfail loodi Maa-ameti geoloogilise baaskaardi 1:50 000 (2020) objektiklassi pinnakatte paksuse samajoonte alusel.

Tabel 3. Uuringuala pinnakatte kihid ja nende filtratsioonikoefitsiendid (K) (Suuroja jt, 2015, 2006, 2005)

Kiht	Stratigraafiline indeks	Litoloogiline koostis	K, m/d
jääjärve setete veepide	lgIII _{jr3}	viirsavi	<10 ⁻⁴
moreeni suhteline veepide	gIII _{jr3}	liivsavimoreen/savi-liivmoreen	10 ⁻³ -10 ⁻¹
tehnogeensed setted	tIV	tehnogeensed setted	1,63-10 ⁻⁷
soosetete veekiht	bIV	soosete	0,001-0,1
moreeni veekiht	gIII _{jr3}	moreen	0,1-1,0
jääjärve setete veekiht	lgIII _{jr3}	peenliiv, aleuriit	0,1-1,0
glatsiofluviaalsete setete veekiht	fIII _{jr3}	liiv	2,0-5,0
glatsiofluviaalsete setete veekiht	fIII _{jr3}	kruusliiv	25,0-50,0

PRMS pinnase tüübi (1 = liiv, 2 = aleuriit, 3 = savi) leidmiseks on tarvis teada pinnakatte lõimisefraktsiooni jaotumust. Savi, aleuriidi ja liiva jaotumise aluseks võeti Maa-ameti mullastiku kaart (2020). Lõimisefraktsioonide esinemise suhteline osakaal määrati vastavalt mullastiku kaardil märgitud lihtlõimisele (Astover jt, 2012; Suuroja jt, 2015, 2006, 2005). Uuringualale jäi kokku 5740 kirjet, millest 584 kirjet olid unikaalsed. Lõimisefraktsiooni protsentuaalse jaotumuse alusel (tabel 4) loodi eraldi rasterfailid.

Tabel 4. Muldade klassifikatsioon mehaanilise koostise järgi (Astover jt, 2012; Suuroja jt, 2015, 2006, 2005)

Mullaerim	Lühend	Savi, %	Liiv, %	Aleuriit, %
Liiv, peenliiv	l, pl	5	90	5
Saviliiv	sl	10	80	10
Kerge liivsavi	ls ₁	10	60	30
Tolmjas kerge liivsavi	tls ₁	20	20	60
Tolmjas raske liivsavi	tls ₂	15	15	70
Raske liivsavi	ls ₃	30	60	10
Keskmine liivsavi	ls ₂	20	40	40
Tolm	t	5	10	85
Liivakas savi	l-s	40	50	10
Tolmjas savi	t-s	40	10	50
Savi	s	50	30	20
Raske savi	s ₃	80	10	10

4.1.6 Maapinna veeläbilaskvus

PRMS parameetrina tuleb iga HRU puhul näidata pindala suhtelist osa, mille kaudu ei toimu sademete infiltratsiooni. Vastava sisendfaili loomiseks kasutati ETAK-i nähtusklasse (kõlvikud, hoone, muud rajatised, maa-alune hoone, tee ja muu liikluskorralduslik rajatis), mis filtreeriti ja liideti üheks vektorkihiks. Seejärel loodi HRU-sid sisaldava vektorfaili koopia, arvutati HRU ruudu pindala, mis ühendati ETAK-i nähtusklasside alusel loodud vektorfailiga. Järgnevalt arvutati igasse HRU ruutu jääva mitteläbilaskva objekti pindala ja leiti HRU pindala ning ruudustikku jääva objekti pindala protsentuaalne suhe. Saadud vett mitteläbilaskva pinna pindala alusel loodi rasterfail (*imprevious_parameters.py*).

4.1.7 Vaatlusandmete töötlemine

Vooluhulkade mudeldamisel on ilmastikuandmed väga olulised. Need lisatakse PRMS mudelisse mõõdetud andmetena. Kohustuslikult tuleb mudelisse sisestada ööpäeva sademete hulk (mm) ja ööpäeva maksimaalne ning minimaalne temperatuur (°C). Mudeli täpsustamiseks võib lisada ilmastikuandmeid ka valikuliselt. Selleks lisati Selja jõe mudelisse veel lumikatte paksus (cm).

Kõik meteoroloogilised ja hüdrooloogilised mõõteandmed saadi Keskkonnaagentuurilt (EELIS, 2021). Väike-Maarja ja Kunda meteoroloogiajaama vaatlustele tuginev kliima andmerida hõlmab ajavahemiku 1966–2020 (tabel 5, joonis 1). Vooluhulga andmed vahemikust 2011–2020 on olemas Selja jõe Varangu hüdroloogiajaama lävendi kohta (tabel 5, joonis 1).

Tabel 5. Vaatlusjaamad (EELIS 2021)

Jaam	Koordinaadid		Kõrgus merepinnast, m
	X	Y	
Kunda meteoroloogia- ja hüdroloogiajaam	6600560	644075	2,7
Väike-Maarja meteoroloogiajaam	6557927	627682	120,7
Varangu hüdroloogiajaam	6595057	633284	53,6

Meteoroloogiliste andmete töötlemiseks mõeldud skriptid täidavad HRU vektorfailis temperatuuri ja sademete väljad. Skript *prism_800m_normals.py* loeb 55 aasta (1966–2020) kuu keskmiste sademete, miinimum- ja maksimumtemperatuuride interpoleeritud rasterfailid ja omistab igale HRU-le vastava väärtuse iga kuu kohta. Skript *ppt_ratio_parameters.py* võtab

arvesse vaadeldud ilmaandmeid (sademete ja temperatuuri tsoonide vektorfailid) ning arvutab erinevuse ilmajaamas mõõdetud ja rasterfailis oleva väärtuste vahel. Sellega saadakse iga HRU kohta maapinna kõrgusest olenev koefitsient, mis korrigeerib sademete ja lumesulamise parameetreid PRMS mudelis.

Sademete ja temperatuuritsoonide määramiseks uuringuala vaatlusjaamade asukohtade põhjal kasutati Voronoi polügooni meetodit ArcGis Pro-s. Seejärel omistati igale tsoonile ilmajaamade punktvektorfaili andmed.

Sisendfailideks on tarvis ka sademete ja maksimum- ning miinimumtemperatuuride 200 x 200 piksliga rasterfaile. Rasterfailide loomiseks kasutati tsoonide tegemiseks loodud punktvektorfaile. Nende alusel interpoleeriti (ArcGis Pro: *Thin plate spline(tin)*) iga kuu kohta sademete ja maksimum- ning miinimumtemperatuuride rasterfailid (.bil).

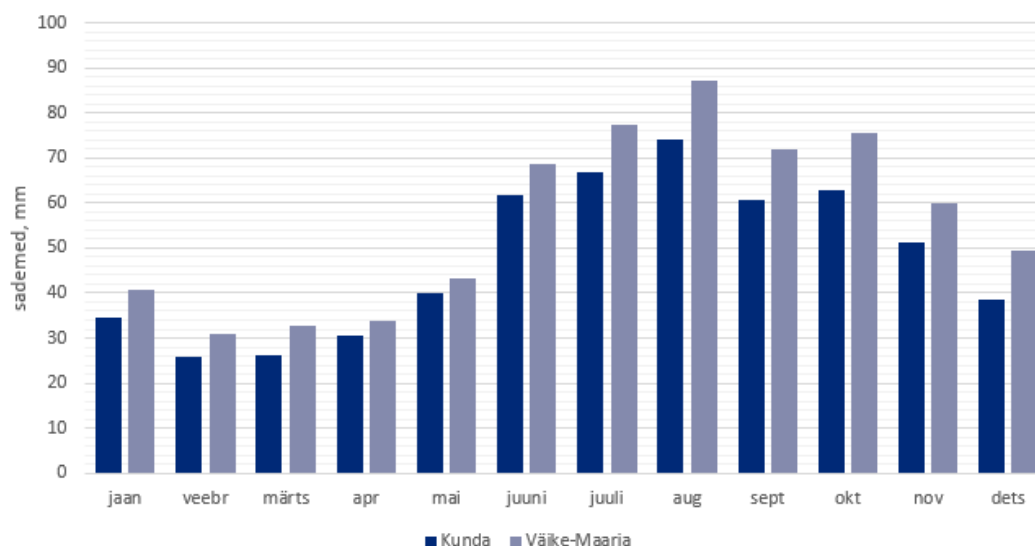
Kuna lumikatte paksust mõõdetakse ainult Väike-Maarja meteoroloogiajaamas ja Kunda meteoroloogiajaamas lumikatte paksuse andmed puuduvad, siis Voronoi polügooni meetodit lumikatte puhul ei rakendatud. Kogu uuringuala ulatuses kasutati Väike-Maarja meteoroloogiajaamas mõõdetud lumikatte paksusi.

Meteoroloogiliste vaatlusandmete analüüsimiseks ja koordinaatidega sidumiseks kasutati andmebaasi PostgreSQL haldusplatvormi pgAdmin 4.21.

4.1.7.1 Sademed

Sademed on oluline komponent valgla veebilansi arvutamisel ning PRMS mudeli sisendina on mõõdetud sademete sisestamine kohustuslik. PRMS parameetrite arvutamiseks kasutati perioodi 1966–2020 kuu keskmisi sademete hulki, kusjuures PRMS andmete failina sisestatakse mudelisse ööpäeva keskmised sademete kogused. Käsitletavasse mudelisse sisestati sademete hulk Väike-Maarja ja Kunda meteoroloogiajaama vaatlusriidade alusel.

Kuude keskmine sademete hulk oli ajavahemikus 1966–2020 Kunda mõõtejaamas 47,6 mm ja Väike-Maarja mõõtejaamas 55,8 mm (joonis 6). Kõige sademeterikkam kuu oli nii Kunda kui ka Väike-Maarja mõõtejaamas august (vastavalt 74,2 mm ja 87,2 mm). Kõige sademetevaesem kuu oli nimetatud perioodil veebruar (Kundas 25,8 mm ja Väike-Maarjas 31,0 mm). Maksimaalne kuu sademete hulk Kunda mõõtejaamas oli 184,7 mm ja Väike-Maarja mõõtejaamas 206,4 mm.



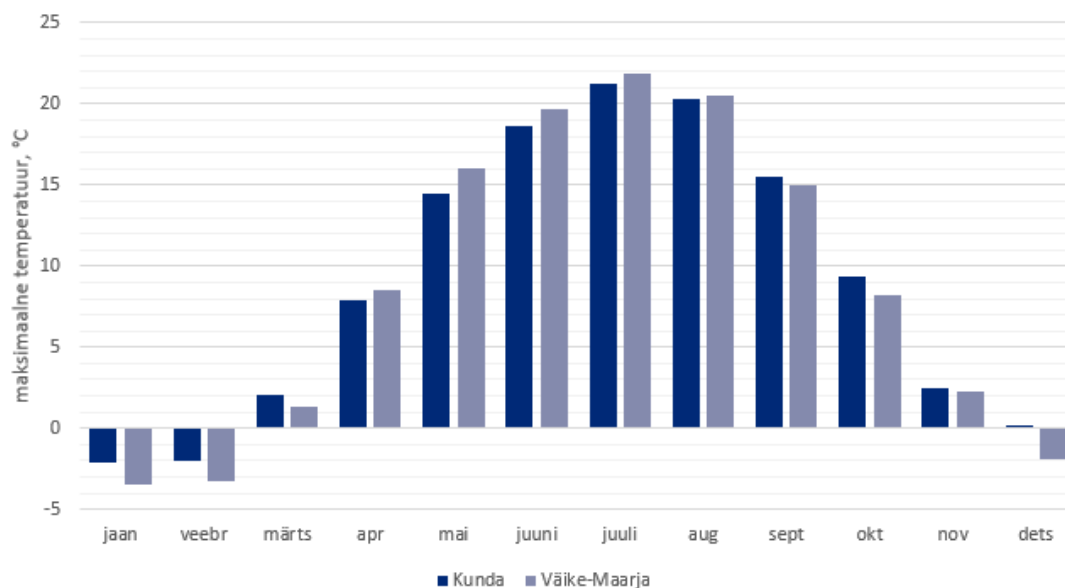
Joonis 6. Kunda ja Väike-Maarja meteoroloogiajaamades mõõdetud kuu keskmised sademete hulgad

4.1.7.2 Temperatuur

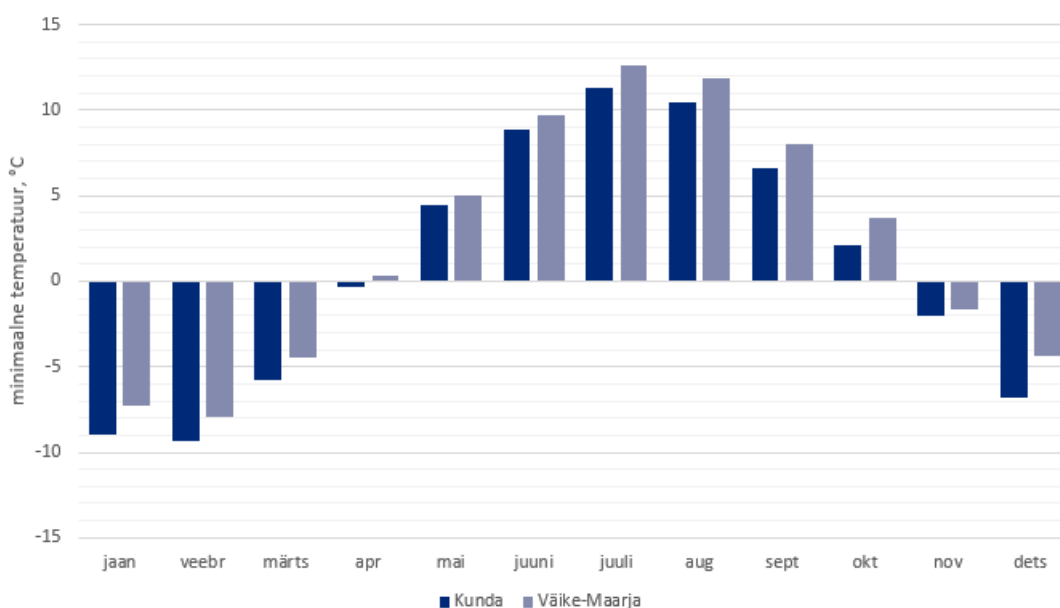
Õhutemperatuur on teine oluline komponent valgla veebilansi arvutamisel ning PRMS mudeli jaoks on mõõdetud miinimum- ja maksimumtemperatuuride sisestamine kohustuslik. PRMS parameetrite arvutamiseks kasutati perioodi 1966–2020 kuu keskmisi minimaalseid ja maksimaalseid temperatuure. PRMS andmete failina sisestati mudelisse ööpäeva keskmised minimaalsed ja maksimaalsed õhutemperatuurid Väike-Maarja ja Kunda meteoroloogiajaamade vaatlusriidade alusel.

Kuude keskmine maksimaalne õhutemperatuur oli ajavahemikus 1966–2020 Kunda mõõtejaamas 9,0 °C ja Väike-Maarja mõõtejaamas 0,9 °C (joonis 7). Kõige soojem kuu oli nii Kunda kui ka Väike-Maarja mõõtejaamas juuli (keskmiselt 21,3 °C ja 11,3 °C). Külmem kuu oli antud perioodil Kunda ja Väike-Maarjas jaamas veebruar (vastavalt keskmiselt -2,1 °C ja -9,3 °C).

Kuude keskmine minimaalne õhutemperatuur oli ajavahemikus 1966–2020 Kunda mõõtejaamas 2,1 °C ja Väike-Maarja mõõtejaamas 0,9 °C (joonis 8). Kõige kõrgemad minimaalsed temperatuurid olid nii Kunda kui ka Väike-Maarja mõõtejaamas juulis (keskmiselt 11,3 °C ja 12,5 °C). Kuu minimaalseimad temperatuurid esinesid antud perioodil Kunda ja Väike-Maarja jaamas veebruaris (vastavalt keskmiselt -9,4 °C ja -7,9 °C).



Joonis 7. Kunda ja Väike-Maarja meteoroloogiajaamades mõõdetud kuude keskmised maksimaalsed õhutemperatuurid



Joonis 8. Kunda ja Väike-Maarja meteoroloogiajaamades mõõdetud kuude keskmised minimaalsed õhutemperatuurid

4.1.7.3 Lumikate

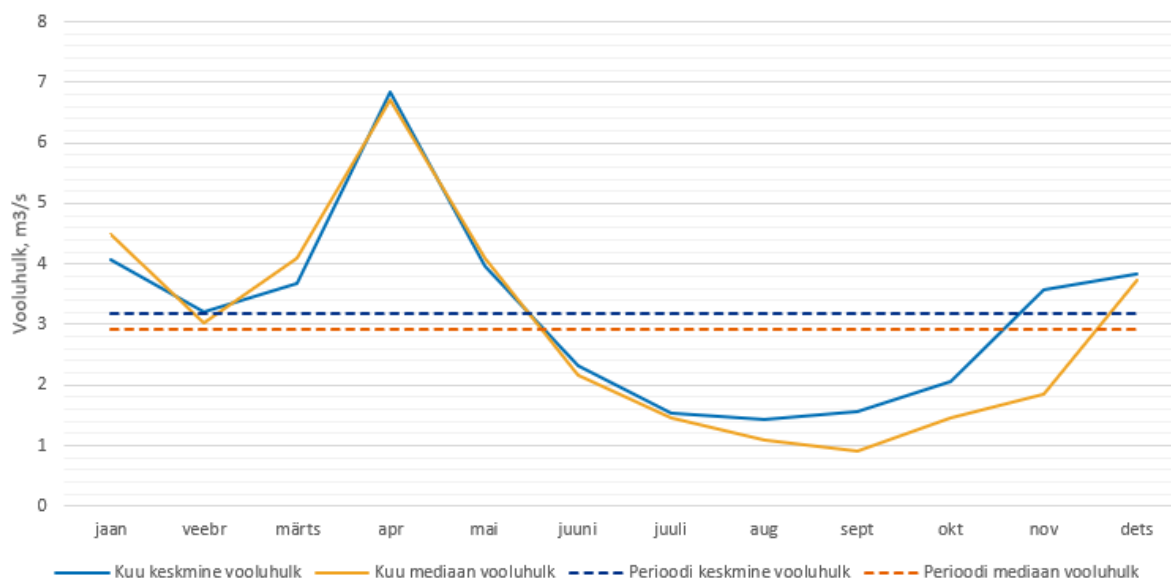
Lumikatte paksust on mõõdetud Väike-Maarja mõõtejaamas kuni 2017. a aprillini käsitsi ja alates 2017. a maist automaatseadmega. Ajavahemikus 1966–2020 oli kuu keskmine lumikatte paksus 6,4 cm. Kõige suurem kuu keskmine lumikate oli veebruaris, keskmiselt 23,5 cm.

Perioodi maksimaalne ööpäevane lumikatte kogupaksus (85 cm) esines vahemikus 9.–11.04.1984.

4.1.7.4 Vooluhulk

Varangu hüdroloogiajaamas mõõdetud Selja jõe aastane vooluhulk oli ajavahemikus 2010–2020 keskmiselt 3,2 m³/s. Samal perioodil oli maksimaalne kuu keskmine vooluhulk aprillis 6,8 m³/s. Madalaim kuu keskmine vooluhulk, keskmiselt 1,4 m³/s, esines augustis.

Perioodi 1966–2020 kuude keskmiste ja nende mediaanvooluhulkade hüdrograaf Varangu mõõtejaamas lävendi kohta on kujutatud joonisel 9. Vahemikus jaanuarist kuni juulini on kuude keskmised ja nende mediaanvooluhulgad praktiliselt samasugused. Aasta teises pooles on mediaanvooluhulk kuude keskmisest tunduvalt madalam. Suurim erinevus esineb novembris, kui kuu keskmine vooluhulk on 3,6 m³/s ja päevakeskmiste mediaanvooluhulk 1,9 m³/s. Perioodi keskmine vooluhulk on 0,24 m³/s võrra suurem kui perioodi mediaanvooluhulk.



Joonis 9. Varangu hüdroloogiajaamas mõõdetud vooluhulkade statistilised näitajad

4.2 Hüdrograafi lõikamine

Traditsiooniliselt tähendab hüdrograafi lõikamine mõõdetud vooluhulga eraldamist kaheks või enamaks komponendiks. Kõige levinum on hüdrograafi kaheks komponendiks eraldamine, mille korral jaguneb vooluhulk otseäravooluks (sh pindmine, maasisene ja mööduva põhjavee äravool) ja baasäravooluks (Hall, 1968; Tallaksen, 1995).

Baasäravoolu eraldamiseks vooluhulgast on kasutusel mitmeid analüütilistele alustele ja kontseptuaalsetele mudelitele põhinevaid regressiooni analüüsimeetodeid (Boussinesq, 1904; Maillet, 1905; Wittenberg, 1994).

Käesoleva töö raames viidi hüdrograafi lõikamine läbi Matlab programmi tööriistaga *Hydregression* (Arciniega-Esparza et al., 2010). Tööriist kasutab baasäravoolu eraldamiseks Wittenbergi regressiooni.

Wittenbergi meetod kasutab baasäravoolu eraldamiseks järgnevaid valemeid (Wittenberg and Sivapalan, 1999):

$$Q_{t-\Delta t} = Q_t e^{\frac{\Delta t}{\gamma}} \quad (\beta = 1) \quad (4-1)$$

$$Q_{t-\Delta t} = \left(Q_t^{\beta-1} + \frac{(\beta-1)\Delta t}{\gamma\beta} \right)^{1/(\beta-1)} \quad (\beta \neq 1) \quad (4-2)$$

Q_t – baasäravool ajahetkel t ;

β, γ – regressiooni konstandid;

kehtib seos $\gamma = 1/(2a - ab)$ ja $\beta = 2 - b$ Brutsaert-Nieber (1977) poolt esitatud seosega dQ/dt ja Q vahel:

$$\frac{dQ}{dt} = -aQ^b \quad (4-3)$$

Q – baasäravool ajahetkel t ;

t – aeg;

a, b – konstandid, mis on fikseeritud väärtused vastavalt konkreetsele valgale. Väärtus b on üldjuhul 1 või jääb vahemikku 1–3 (Yang et al., 2020).

5. Tulemused ja arutelu

Magistritöö käigus konstrueeriti Selja jõe Varangu hüdroloogiajaama lävendi valgla veebilanssi kirjeldav PRMS mudel. Mudeli tööperiood on ajavahemik 01.01.1966 – 31.12.2020. PRMS mudelis kasutatud arvutusmoodulid, mis töötlevad andmeid eraldi iga HRU kohta, on esitatud tabelis 6.

Tabel 6. PRMS mudelis kasutatud moodulid

Moodul	Kirjeldus	Täpsustatud moodul
Arvutusjärjestuse moodul	Määrab arvutusjärjestuse ja aktiivsed PRMS moodulid	call_modules
Valgla moodul	Arvutab iga HRU peamised muutujad (nt valgla asukoht, HRU suurus, HRU tüüp)	basin
Aegrea andmemoodul	Loeb sisse andmefailis olevad aegread ja muudab need kättesaadavaks teistesse moodulitesse sisestamiseks ja statistiliste muutujate arvutamiseks	obs
Vooluvõrgu moodul	Genereerib valikulise vooluteekonna arvutatud voolude suunamiseks kõrgematelt aladelt madalamatele ja põhjavee reservuaaridele	cascade
Vooluhulga moodul	Arvutab vooluhulga ja pindmise, maasisese ja põhjaveeäravoolu summa	strmflow
Pindmise äravoolu moodul	Arvutab pindmise äravoolu infiltratsiooni ja pinnase küllastatuse ülejäägina	srunoff_smidx
Põhjavee moodul	Arvutab sisse- ja väljavoolu ning vee mahu põhjavee reservuaarides	gwflow
Sademetekinnipidamismoodul	Arvutab taimkatte poolt kinnipeetava sademete hulga	intcp
Pinnakatte moodul	Arvutab pinnakatte tsooniga seotud muutujad, pinnase niiskuse ja gravitatsioonipõhised muutujad	soilzone
Sademetek moodul	Arvutab ööpäevaste sademete jaotumuse	precip_1sta
Temperatuuri moodul	Arvutab ööpäeva keskmiste temperatuuride jaotumuse	temp_1sta
Päikesekiirguse moodul	Arvutab tegeliku ööpäevase lühilainelise kiirguse	ddsolrad
Päikesekiirguse moodul	Arvutab ööpäevase potentsiaalse lühilainelise kiirguse päikesetõusu ja -loojangu vahelisel ajal	soltab
Potentsiaalse aurumise moodul	Arvutab potentsiaalne aurumise	potet_jh

Moodul	Kirjeldus	Täpsustatud moodul
Transpiratsiooni perioodi moodul	Määrab aktiivse transpiratsiooni perioodi	transp_tindex
Lumikatte moodul	Arvutab lumikattega seotud muutujad	snowcomp

5.1 Tundlikkusanalüüs

Mudeli tundlikkuseanalüüsiga tuvastati parameetrid, mis mõjutavad kõige enam arvutatavat baasäravoolu (*basin_gwflow_cms*) ja summaarset vooluhulka (*basin_cms*) Varangu lävendis. Arvutatud baasäravool sõltus kõige enam sisendparameetrist *gwstor_int*, mis määrab algse koguse põhjavett igas põhjaveereservuaaris, ja *gwflow_coef*, mis arvutab põhjavee äravoolu vooluvõrku.

Summaarset vooluhulka *basin_cms* mõjutab kõige suuremal määral *gwflow_coef*. Samuti mõjutavad vooluhulka märkimisväärselt *soil_moist_max* ning kiire ja aeglase maasisese äravoolu lineaarsed koefitsiendid (*fastcoef_lin*, *slowcoef_lin*). *Soil_moist_max* tähistab mullas olevat vaba vett, mis on võimeline aurustuma. Kiire ja aeglase maasisese äravoolu lineaarsed koefitsiendid mõjutavad oluliselt mudeldatud hüdrograafi piike (ekstreemseid väärtusi) pärast suuri sadusid. Kogu valgla veevahetust mõjutab igakuine õhutemperatuuri koefitsient *Jh_coef*, mida kasutatakse potentsiaalse evapotranspiratsiooni arvutamiseks Jensen-Haise valemiga. Kogu valgla veevahetust mõjutavad lisaks Jensen-Haise koefitsiendile ka *ssr3gw_max*, *soil2gw_max*, *soil_rechr_max* ja *ssstor_init*. *Ssr3gw_max* ja *soil2gw_max* määravad maksimaalse vee hulga, mis saab liikuda gravitatsiooni- ja kapillaarvee reservuaaridest põhjavee reservuaari. *Soil_rechr_max* parameeter määrab maksimaalse vee hulga rippuva kapillaarvee reservuaaris. Esialgse vee koguse gravitatsioonivee ja esmase äravoolu reservuaaris omistab parameeter *ssstor_init*.

5.2 Kalibreerimine ja valideerimine

Mudel tuli pärast esmast käitamist ja tundlikkusanalüüsi kalibreerida ning valideerida, kuna sisestatud andmed ja parameetrid võisid olla ebatäpsed. Kalibreerimise käigus leiti parameetrite vahemikud, mis minimeerisid mõõdetud ja mudeldatud vooluhulkade vahe. Valideerimisel testiti mudelit kalibreerimise käigus korrigeeritud parameetritega.

Mudeli kalibreerimiseks kasutati ööpäevaseid vooluhulga andmeid ajavahemikus 2014–2015. Parameetrite esialgsete väärtuste genereerimiseks kasutati Gsflow-Arcpy skriptikogumit, võttes arvesse uuringuala hüdroloogilisi, pinnakatte ja maakasutusega seotud omadusi. PRMS mudelit kalibreeriti käsitsi. Arvutatud vooluhulkasid võrreldi Varangu hüdroloogiajaamas mõõdetud vooluhulkadega.

Kalibreerimine viidi läbi selleks, et täpsustada tundlike parameetrite väärtuste sobilikud vahemikud (tabel 7). Kalibreerimisel korregeeriti mudeli tundlikke parameetreid seni, kuni saavutati mõõdetud ja arvutatud vooluhulkade hüdrograafide parim ühilduvus visuaalse ning statistilise hinnangu järgi. Hüdrograafide visuaalset sarnasust hinnati hüdrograafi tõusude ja languste, piikide ajastuse ja hüdrograafi kõrguse alusel. Lõputöös hinnatakse kalibreerimis- ja valideerimistulemusi statistilisel Nash-Sutcliffe'i efektiivsuse (NSE) ja Kling-Gupta efektiivsuse (KGE) koefitsiendiga (Gupta et al., 1999; Nash and Sutcliffe, 1970).

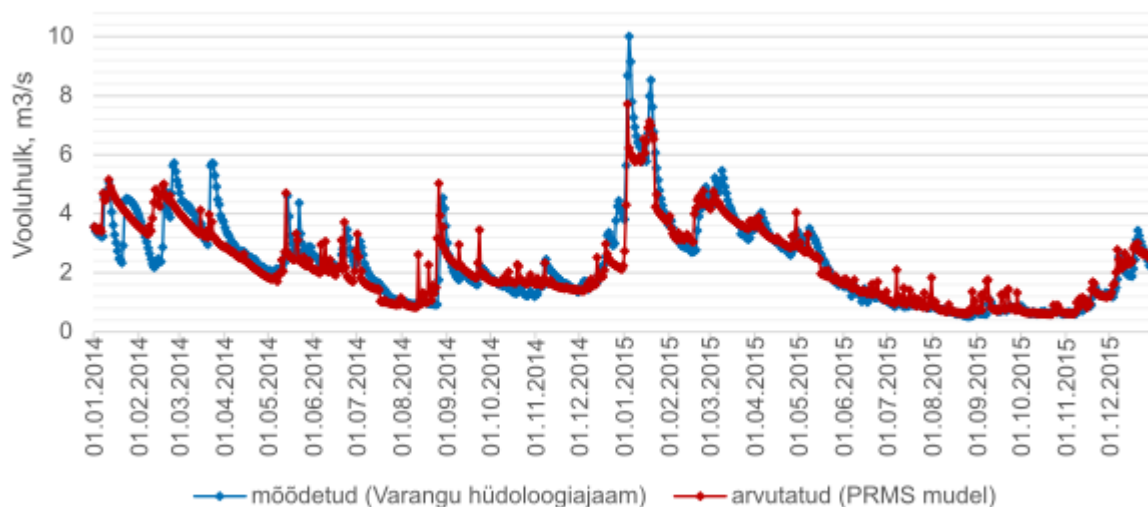
Mudeli kalibreerimisperioodil esines 12.–27. augustil 2014. aastal suurem sademete hulk. Antud perioodi kasutati sademe äravoolu kalibreerimiseks. Mõõdetud vooluhulkade hüdrograafil on märgata suure lumesulavee lisandumist jaanuaris 2015, mille järgi kalibreeriti antud mudelil lumesula ja lumesulavee infiltreerumise parameetreid. Baasäravoolu kalibreeriti, reguleerides parameetreid *gwsink_coef*, *gwstor_init* ja *gwflow_coef*, kasutades kalibreerimisperioodi jäävat sademetevaest perioodi (2015. aasta september-oktoober).

Tabel 7. Kalibreeritud parameetrid ja nende kalibreerimisvahemik

Kalibreeritavad näitajad	Vahemik	Kalibreeritavad näitajad	Vahemik
jh_coef	0,005...0,06	gwsink_coef	0,0...1,0
soil_moist_max	0,001...10,0	gwstor_init	0,0...10,0
soil_rechr_max	0,001...5,0	gwflow_coef	0,001...0,5
fastcoef_lin	0,001...1,0	snowinfil_max	0,0...20,0
fastcoef_sq	0,001...1,0	soil2gw_max	0,0...5,0
slowcoef_lin	0,001...0,5	ssr3gw_exp	0,0...3,0
slowcoef_sq	0,001...1,0	ssstor_init	0,0...20,0

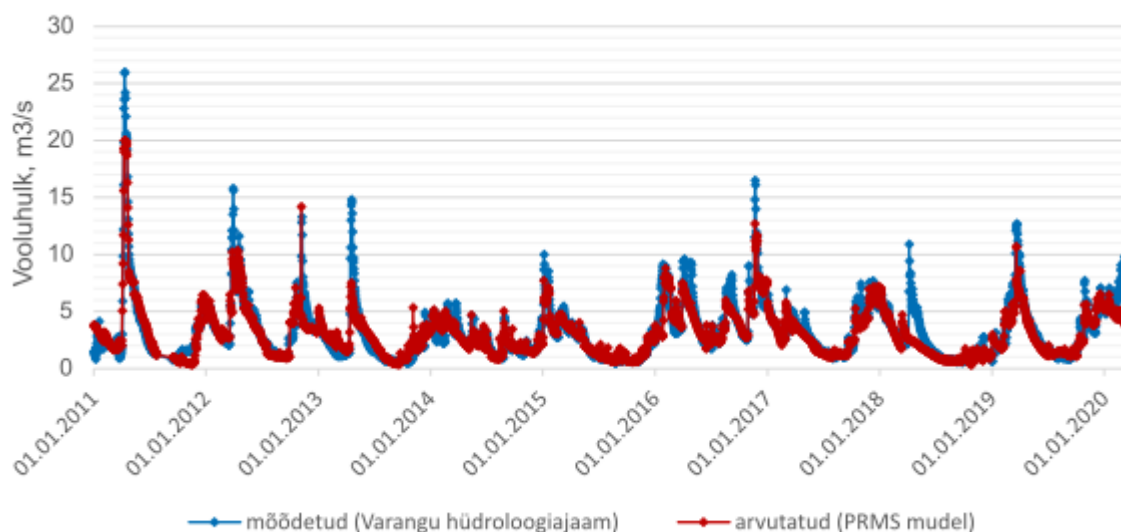
Kalibreerimisjärgsed arvutatud ja mõõdetud hüdrograafid on toodud joonisel 10. Maksimaalne äravool antud perioodil mõõdeti 4. jaanuaril 2015. aastal, kui vooluhulk oli 10 m³/s. Arvutatud vooluhulk samal kuupäeval on 7,7 m³/s, mõõdetud ja arvutatud vooluhulkade vahe on 2,3 m³/s. Peale kalibreerimist on mõõdetud ja arvutatud vooluhulkade korrelatsiooni koefitsient 0,817, Nash-Sutcliffe'i efektiivsus (NSE) 0,815 ja Kling-Gupta efektiivsus (KGE) 0,847. NSE

kohaselt on mudeli efektiivsus väga hea (Moriassi et al., 2007) ja KGE kohaselt hea (Thiemig et al., 2013).



Joonis 10. Kalibreerimisperioodil mõõdetud ja arvutatud vooluhulkade hüdrograaf

Kalibreeritud PRMS mudelit valideeriti täiendavalt 10-aastase perioodi vältel (01.01.2011 – 01.01.2021). Valideeritud ja mõõdetud vooluhulkade hüdrograafid on toodud joonisel 11. Antud perioodi mõõdetud ja arvutatud vooluhulkade korrelatsiooni koefitsient oli 0,723, NSE 0,749 (hea) ja KGE 0,791 (hea). Maksimaalne vooluhulk Varangu hüdroloogiajaamas antud perioodil mõõdeti 12.04.2011 ($25,9 \text{ m}^3/\text{s}$), arvutatud väärtus samal kuupäeval on $20,12 \text{ m}^3/\text{s}$. Maksimaalse äravoolu viga on $5,8 \text{ m}^3/\text{s}$ ja minimaalse äravoolu viga $0,001 \text{ m}^3/\text{s}$. Kalibreerimise ja valideerimise tulemused näitavad, et mudel on piisavalt täpne arvutamaks Selja jõe sademete äravooluprotsesse.

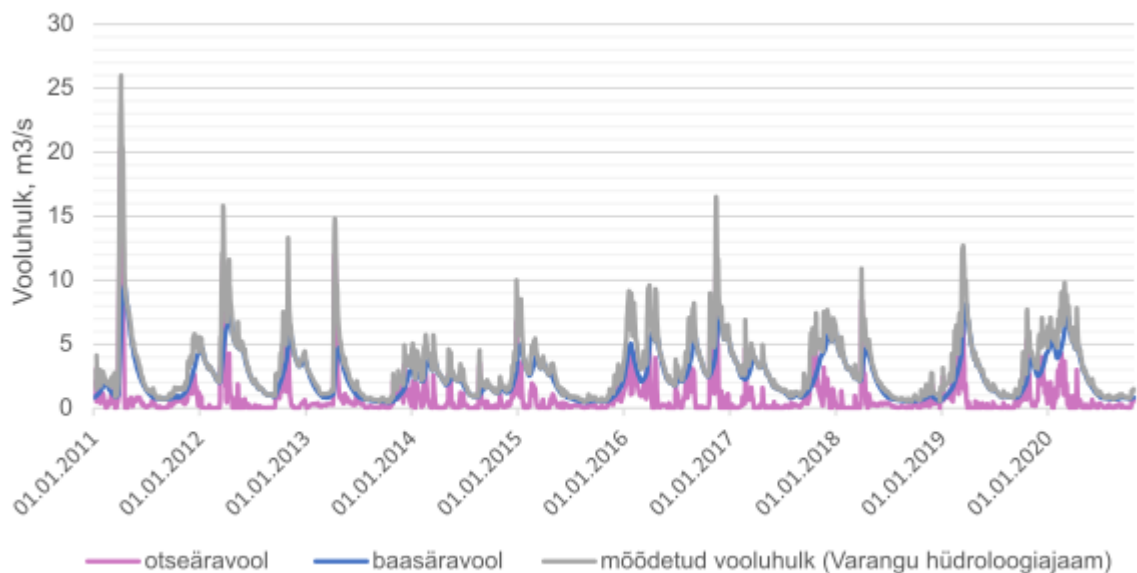


Joonis 11. Valideerimisperioodil mõõdetud ja arvutatud vooluhulkade hüdrograaf

5.3 Baasäravool ja netoinfiltratsioon

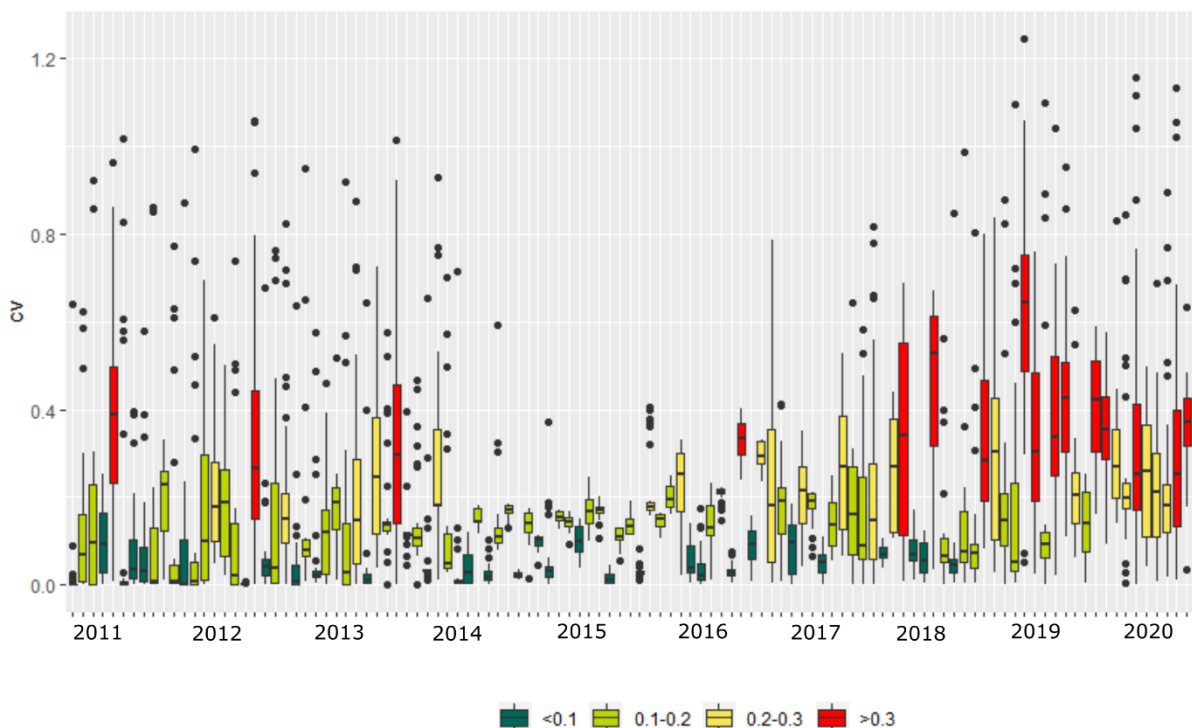
Kuna PRMS mudel koosneb paljudest kalibreeritavatest näitajatest, siis ei pruugi vooluhulga alusel parameetreid kalibreerides reaalselt uuringuala hüdroloogilist ja hüdrogeoloogilist situatsiooni kirjeldavat mudelit saada. Et saadud tulemusi kontrollida, kasutati baasäravoolu osakaalu leidmiseks ka hüdrograafi lõikamist.

Varangu hüdroloogiajaamas mõõdetud ööpäevaste vooluhulkade statistilisel analüüsil eraldatud baasäravoolu ja otseäravoolu (*quickflow*) tulemused on toodud joonisel 12. Leiti, et perioodil 2011–2020 moodustas kogu vooluhulgast keskmiselt 79% baasäravool. Otseäravoolu minimaalne osakaal antud perioodil oli 0% ja maksimaalne osakaal 75%.



Joonis 12. Varangu hüdroloogiajaamas mõõdetud vooluhulkade lõigatud hüdrograaf

Mudeliga arvutatud ja hüdrograafi lõikamisel saadud baasäravoolude proportsioonide võrdlemisel kasutati variatsioonikoefitsienti (cv), mis tähistab standardhälbe ja keskmise väärtuse suhet. Variatsioonikoefitsient alla 0,1 on väga hea, 0,1–0,2 hea, 0,2–0,3 rahuldav ja üle 0,3 mitterahuldav (Gomez and Gomez, 1984). Baasäravoolude võrdlusel saadud variatsioonikoefitsiendid on toodud joonisel 13.



Joonis 13. Baasäravoolude osakaalude võrdlusel saadud kuised variatsioonikoefitsiendid (cv)

Baasäravoolude osakaalude võrdlusel tuleb välja, et variatsioonikoefitsient oli kas väga hea või hea perioodil 2014–2018, mil esinesid madalamad vooluhulgad. Samuti oli variatsioon valdavalt väga hea või hea ajavahemikus 2011–2014. Antud perioodil leidub kolm kuud, mil variatsioonikoefitsiendi kokkulangevus oli mitterahuldav. Antud kuudel esinevad Varangu hüdroloogiajaamas mõõdetud tulemuste põhjal suuremad vooluhulga kasvud. Kõige enam mitterahuldava variatsioonikoefitsiendiga kuid jääb perioodi 2018–2020.

Antud erinevused mudeldatud ja arvutatud baasäravoolu osakaaludes võivad olla tingitud asjaolust, et mudelit ei suudetud kalibreerida mõõdetud vooluhulkadega üks ühele. Peamised raskused kalibreerimisel esinesid just suurte vooluhulkade korral, mis langevad kokku ka mitterahuldava variatsioonikoefitsiendi tulemustega. Samuti ei viidud läbi meetodikate võrdlust, et leida mõõdetud vooluhulkade hüdrograafi lõikamiseks kõige sobivamat meetodit, vaid tugineti kirjandusele. Seega ei pruugi kasutatud meetod olla kõige representatiivsem Eesti geoloogilises situatsioonis ja olukorras, kus suur osa valglast paikneb karstunud alal.

PRMS meetodiga saadud baasäravoolu ja netoinfiltratsiooni koguseid võrreldi ka kirjanduse alusel varasemate mõõtmis ja arvutustulemustega (tabel 8). Aastatel 1932–1959 Seljajõe-Arkna hüdroloogiajaamas (vahetult allpool Sõmeru jõe suubumist Selja jõkke) mõõdetud andmete alusel arvutatud veebilansist moodustas põhjavee äravool keskmiselt 47% (Protasjeva ja Eipre,

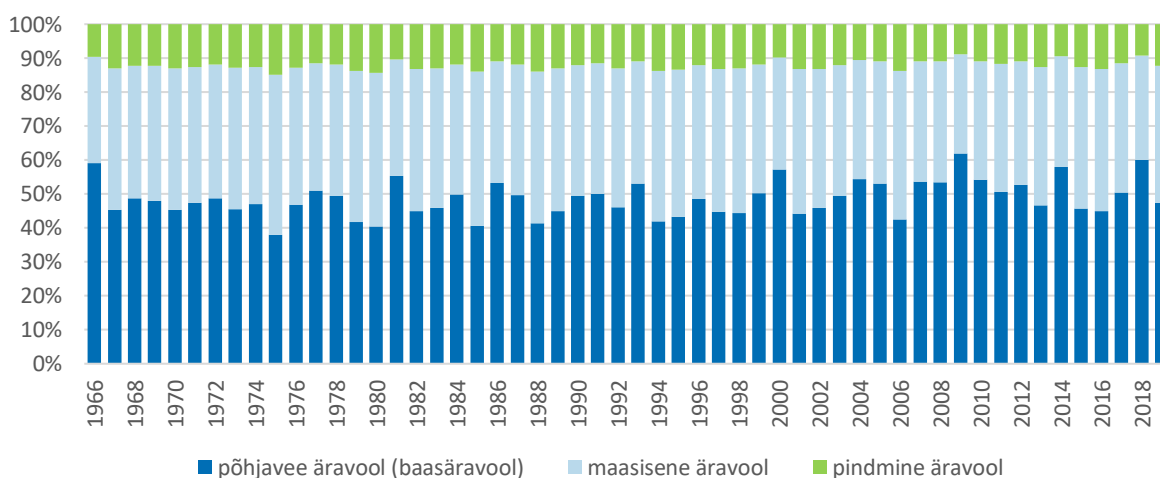
1972). 1958. aasta miinimumperioodi (14.–28-07.1958) põhjavee osakaaluks saadi allikate äravoolude mõõtmiste tulemusel 75%. Suurvee ajal 15.–17.04.1959 20% ja sügise madalvee perioodil 30.10–2.11.1959 51%.

Tabel 8. Baasäravoolu osakaalude võrdlus

	Keskmine, %	Baasäravoolu periood, %	Kevadine kõrgvesi, %	Sügise kõrgvesi, %
PRMS	49	82 (59; 96)	47 (31; 78)	44 (23; 75)
Protasjeva ja Eipre, 1972	47	75 / 51	20	-

*sulgudes minimaalne ja maksimaalne baasäravoolu osakaal antud perioodil

PRMS arvutuste alusel moodustab põhjavee äravool (baasäravool) perioodil 1966–2020 kogu äravoolust 49% (joonis 14). Baasäravoolu situatsioonis oli PRMS mudeli arvutatud perioodi keskmine võrreldes Protasjeva ja Eipre (1972) tulemustega mõnevõrra suurem, 82%, jäädes aasta lõikes keskmiselt vahemikku 59–96%. Kevadisel kõrgveeperioodil (mai, aprill, märts) oli baasvoolu aasta keskmine osakaal 47% (31–78%) ja sügisesel kõrgveeperioodil 44% (23–75%).



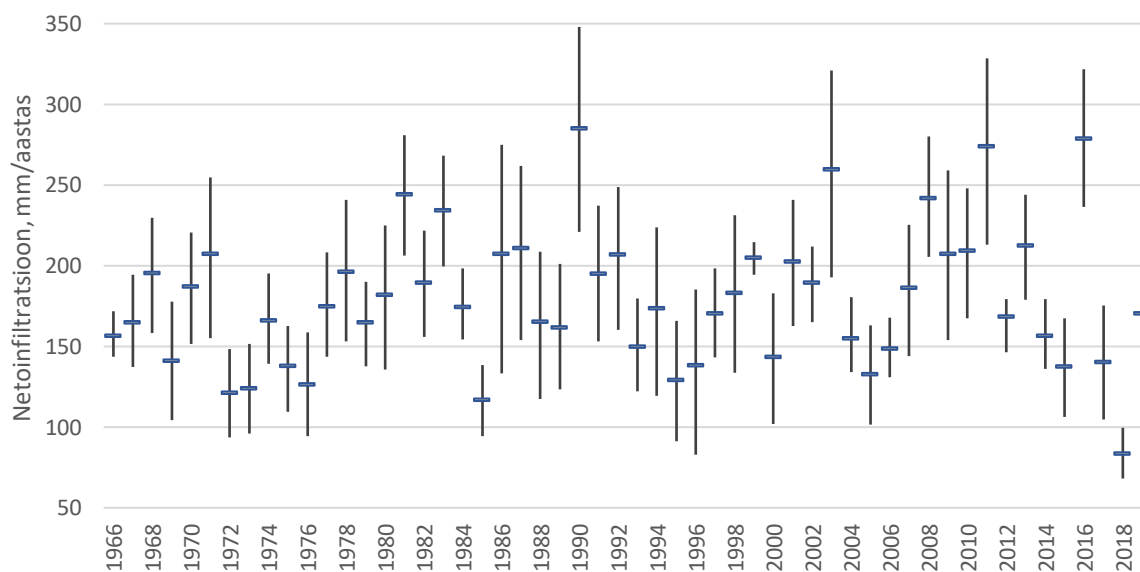
Joonis 14. Äravoolu komponentide jaotumine

Varasemate uuringute (Eipre, 1987; Polikarpus, 2018; Vallner ja Porman, 2016) raames mõõdetud ja arvutatud netoinfiltratsiooni väärtused on 30–263 mm/aastas (tabel 9). PRMS mudeli arvutuste põhjal jääb alamvalglate netoinfiltratsioon perioodil 1966–2020 vahemikku 68–348 mm/aastas, keskmiselt 178 mm/aastas. Joonisel 15 on ära toodud alamvalglate aastate keskmised ning maksimum- ja miinimumnetoinfiltratsiooni väärtused. Kõige suurem netoinfiltratsiooni väärtus (348 mm/aastas) esines 1990. aastal, kui on mõõdetud perioodi kõige

suurem sademete hulk (816 mm/aastas). Kõige madalam aastane netoinfiltratsioon (68 mm/aastas) esines 2018. aastal. 2018. aastal mõõdeti sademete hulgaks 394 mm.

Tabel 9. Netoinfiltratsiooni väärtuste võrdlus uuringualal

	Vallner ja Porman, 2016	Eipre, 1987	Polikarpus, 2018	PRMS
Netoinfiltratsioon, mm/aastas	90-120	56-263	57-192	68-348

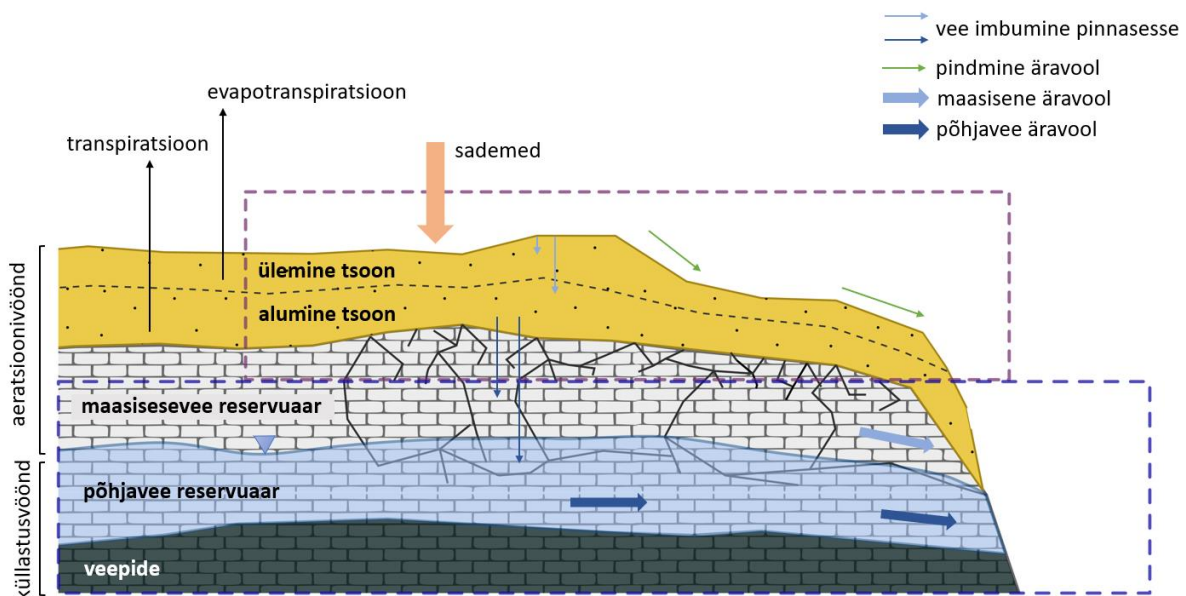


Joonis 15. Alamvalgate keskmised, miinimum- ja maksimumnetoinfiltratsiooni väärtused

5.4 Kontseptuaalne mudel

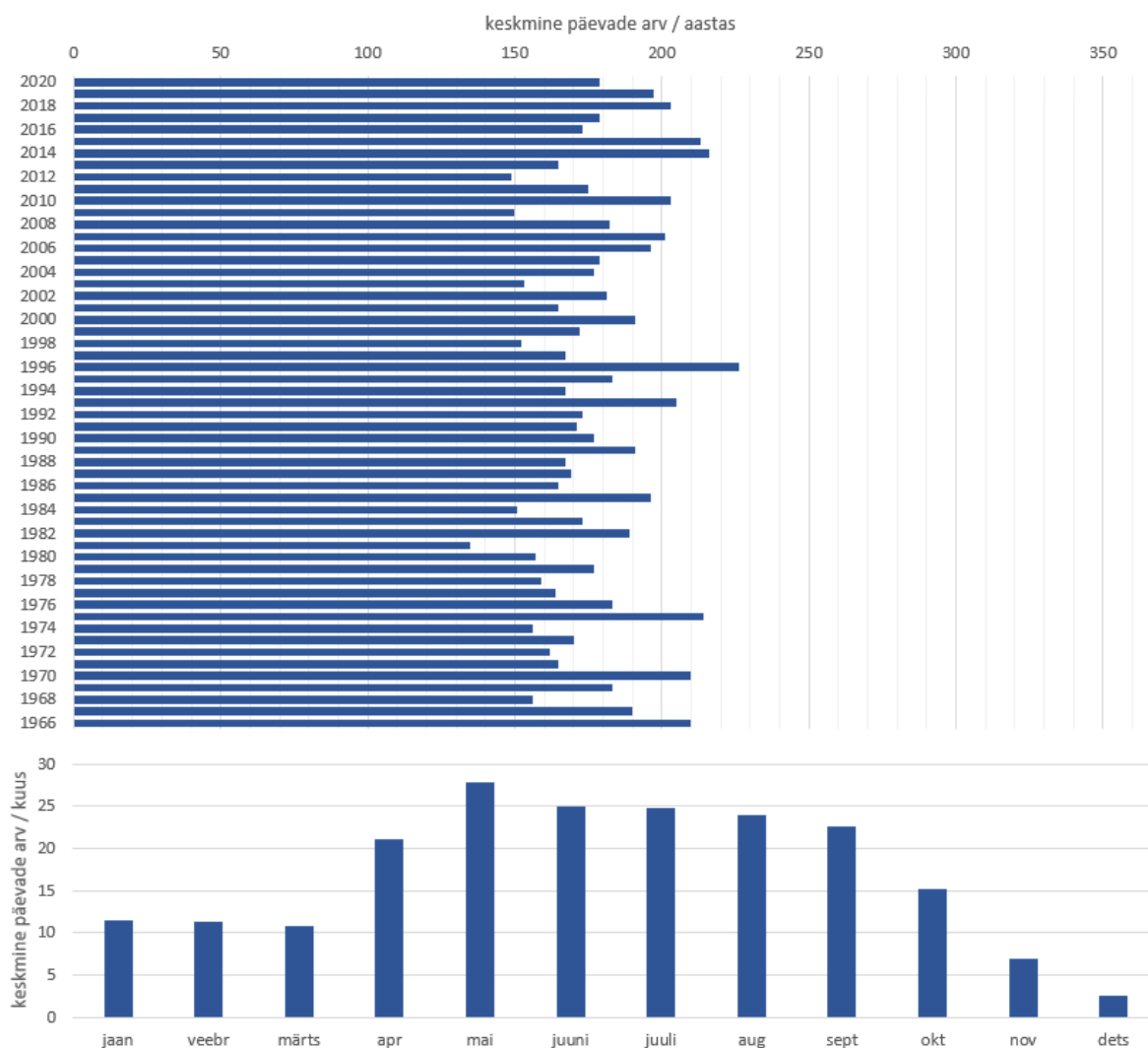
Kuna mudeli valideerimise tulemused olid head, siis jooksutati mudel uuesti koos mõõdetud sademete ja õhutemperatuuri andmetega alates 1966. aastast ja saadud tulemuste alusel loodi uuringuala veebilansist ja äravoolu jaotusest kontseptuaalsed mudelid. Kontseptuaalsed mudelid koostati baasäravoolu (suvine ja talvine madalvesi) ning kevadise ja sügise suurevee perioodi kohta.

Loodud mudeli põhjal jaguneb pinnakatte kiht kaheks (ülemiseks ja alumiseks) tsooniks, millesse vesi liigub sademete või lumesulavee tulemusel. Ülemises tsoonis olev vesi on mõjutatav evapotranspiratsioonist ning toidab pindmist äravoolu. Alumisest tsoonist on vesi kättesaadav transpiratsiooniks või liigub edasi kas maasisesevee või põhjavee reservuaari. Maasisesevee reservuaarist väljub vesi maasisese äravooluna või suundub põhjavee reservuaari. Põhjavee reservuaarist jõkke liikuvat vett mõistetakse põhjavee äravooluna (baasäravool) (joonis 16).



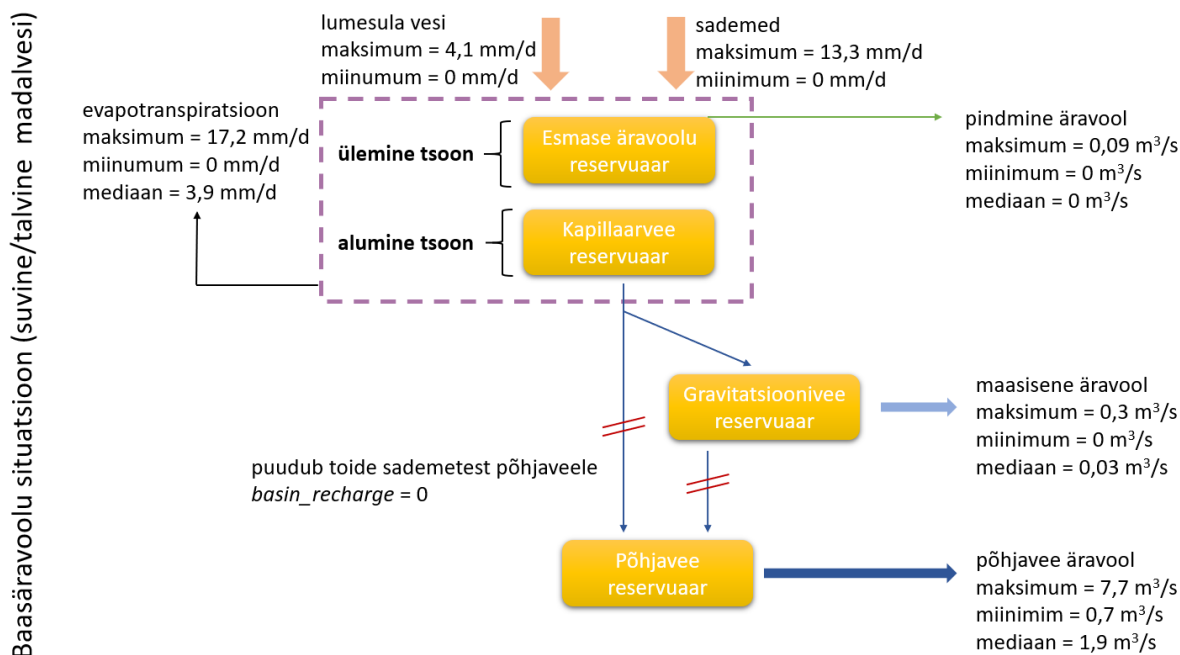
Joonis 16. Uuringuala põhjavee-pinnavee kontseptuaalne mudel. Pinnakatte/epikarsti tsoon on märgitud lilla katkendjoonega, põhjavee ja maasisese vee reservuaar sinise katkendjoonega

Baasäravoolu situatsiooni määratlemiseks kasutati parameetri *basin_recharge* väärtust 0, mis tähendab, et antud perioodil puudub toide sademetest põhjaveele (netoinfiltratsioon). Madalvee periood esines uuringualal keskmiselt 178 päeval, minimaalselt 135 päeval ja maksimaalselt 226 päeval aastas. 55 aasta keskmiselt esines baasäravoolu situatsioon kõige enam mais (38 päeva jooksul), kõige vähem detsembris (3 päeva jooksul) (joonis 17).



Joonis 17. Baasäravoolu situatsiooni esinemine aastate ja kuude lõikes

Baasäravoolu situatsioonis moodustab enamuse äravoolu osakaalust põhjavee äravool (>90%), maasisene äravool on 8–9% ja pindmine äravool 1–2%. Perioodi ööpäeva maksimaalne põhjavee äravool oli $7,7 \text{ m}^3/\text{s}$ ja minimaalne äravool $0,7 \text{ m}^3/\text{s}$, põhjavee baasäravoolu mediaanväärtus oli $1,9 \text{ m}^3/\text{s}$. Maksimaalne ööpäevane pindmine äravool oli $0,09 \text{ m}^3/\text{s}$ ja maasisene äravool $0,3 \text{ m}^3/\text{s}$; mõlema puhul oli ööpäevane minimaalne äravool $0 \text{ m}^3/\text{s}$. Baasäravoolu situatsiooni iseloomustab ka vähene sademete kogus (kuni $13,3 \text{ mm}/\text{ööpäevas}$) ja väike lumesulavee kogus (kuni $4,1 \text{ mm}/\text{ööpäevas}$). Maksimaalne evapotranspiratsiooni väärtus oli $17,2 \text{ mm}/\text{ööpäevas}$ ja mediaanväärtus $3,9 \text{ mm}/\text{ööpäevas}$ (joonis 18).



Joonis 18. Uuringuala veebilanss baasäravoolu situatsioonis

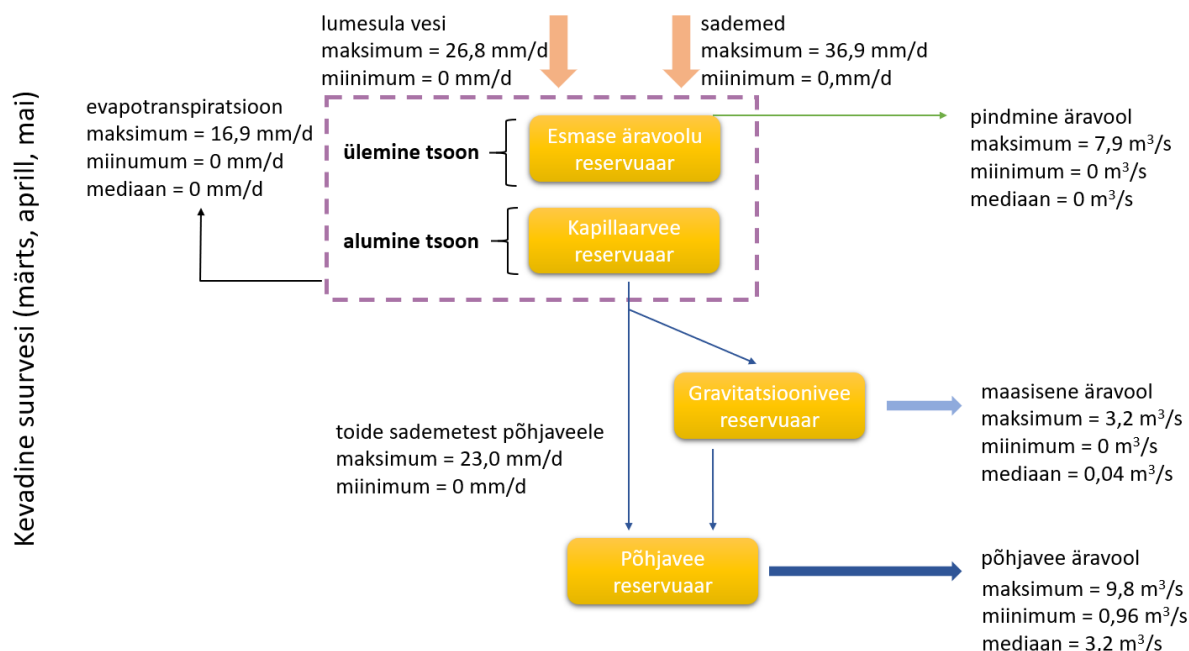
Kevadise suurvee situatsiooni aluseks võeti kuud, mille korral kevadine suurvesi Varangu hüdroloogiajaamas kõige suurema tõenäosusega esineb – märts, aprill ja mai (joonis 9). Kevadise suurvee ajal moodustab põhjavee äravool 52–84% kogu äravoolust. Maasisese äravoolu osakaal Selja jões antud perioodil oli 10–42% ning pindmine äravool moodustas 5–8%.

Mudeli põhjal oli ööpäevane maksimaalne põhjavee äravool 9,8 m³/s ja minimaalne äravool 0,96 m³/s (joonis 19). Ööpäevase põhjavee baasäravoolu mediaanväärtus oli 3,2 m³/s. Maasisene äravool oli ööpäevas maksimaalselt 3,2 m³/s ning pindmine äravool 7,9 m³/s. Mõlemal puhul oli minimaalne ööpäevane äravool 0 m³/s. Maasisese äravoolu ööpäevane mediaanväärtus oli 0,4 m³/s. Kevadist suurvee perioodi iseloomustab suur lumesulavee (kuni 26,8 mm/ööpäevas) ja sademete kogus (kuni 36,9 mm/ööpäevas). Evapotranspiratsiooni suurus oli üsna lähedane baasäravoolu situatsioonile, 16,9 mm/ööpäevas.

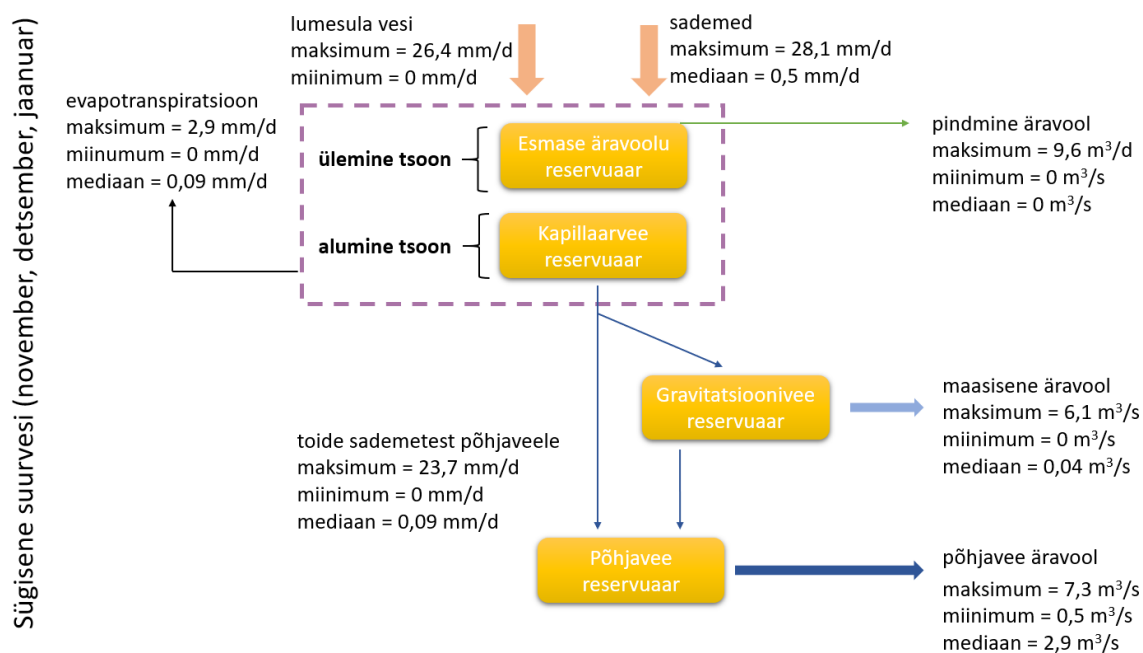
Sügisese suurvee situatsiooni aluseks võeti kuud, mille korral sügisene suurvesi Varangu hüdroloogiajaamas kõige suurema tõenäosusega esineb – november, detsember, jaanuar (joonis 9). Sügisese suurvee situatsioonis moodustab põhjavee äravool kogu äravoolust 49–82%. Maasisese äravoolu osakaal jäi vahemikku 6–43% ja pindmine äravool moodustas 9–18%.

Ööpäevane maksimaalne põhjavee äravool sügisese suurvee ajal Varangu hüdroloogiajaamas oli 7,3 m³/s ja ööpäevane miinumum 0,5 m³/s (joonis 20). Ööpäevase põhjavee äravoolu

mediaan oli 2,9 m³/s. Maasisene äravool oli maksimaalselt 6,1 m³/s ööpäevas ning mediaanväärtus 0,04 m³/s. Pindmine maksimaalne äravool oli 9,6 m³/s ööpäevas. Sügisest suurvett iseloomustab rohke sademete hulk (kuni 28,1 mm/ööpäevas) ja lumesulavee kogus (kuni 26,4 mm/ööpäevas). Maksimaalne evapotranspiratsiooni väärtus oli 2,9 mm ööpäevas.



Joonis 19. uuringuala veebilanss kevadise suurvee situatsioonis



Joonis 20. Uuringuala veebilanss sügisese suurvee situatsioonis

Kokkuvõte

Käesoleva magistritöö eesmärk on selgitada välja PRMS (*The Precipitation-Runoff Modeling System*) ehk pinnavee äravoolukomponentide mudeldamiskompleksi ja olemasolevate algandmete sobivus Eesti geoloogilistes oludes hüdroloogiliseks mudeldamiseks ning leida Selja jõe valgla veebilanss. Töö käigus koostati Selja jõe valglale PRMS mudel, mille abil arvutati antud valgla veebilanss. Saadud kontseptuaalse mudeli kontrollimisel kasutati alternatiivset meetodit – hüdrograafi lõikamist.

PRMS mudeli sisendfailide loomiseks kasutati Gsflow-Arcpy Pythoni skriptikogumit. Need skriptid lihtsustavad tunduvalt algandmete eeltötlust ja mudeli sisendfailide loomist. Kuna skriptid on loodud USA algandmeid silmas pidades, siis tuleb Eestis olemasolevate algandmete puhul tihti andmeid veel eeltöödelda, et neid oleks võimalik skriptide sisendandmetena kasutada.

Näiteks puuduvad Eestis rasterkujul meteoroloogilised andmed (sademete jaotumine, õhutemperatuur). Seega tuleb enne mudeli sisendfailide loomist Excel-failina saadud väärtused siduda vaatlusjaama asukohaga ning selle alusel luua rasterfailid. Kõige tömahukamaks osutus andmete ettevalmistamisel Eesti mullakaardi lihtlõimiste väärtuste klassifitseerimine ja nende alusel fraktsiooni osakaalu leidmine. Täpsemalt on andmete ettevalmistamise etapid ära toodud peatükis „Rajatingimused“. Edaspidi, mudeli sisendfailide loomise automatiseerimiseks, oleks mõistlik täiendada olemasolevaid Gsflow-Arcpy Pythoni skriptifaile või luua ArcDesktop töövoog, võttes arvesse Eesti algandmete kättesaadavust ja vormingut.

Selja jõe valglale loodud mudeli valideerimisel saadi NSE väärtuseks 0,749, mis tähendab head mudeli efektiivsust vooluhulkade modelleerimisel. Saadud mudeli tulemuste põhjal loodi Selja jõe valglale madalvee ning kõrgvee (sügisese ja kevadise) perioodi silmas pidades kontseptuaalsed mudelid, mis kirjeldavad antud uuringuala evapotranspiratsiooni, äravoolude jaotumist ning põhjavee toidet.

Saadud kontseptuaalse mudeli kontrollimisel võrreldi omavahel mudeli arvutatud ja Selja jõe Varangu hüdroloogiajaamas mõõdetud vooluhulga hüdrograafi lõikamisel saadud baasäravoolu väärtusi. Baasäravoolude jaotumise võrdlemiseks kasutati variatsioonikordajat (kuude keskmine väärtus 0,14), mille põhjal võib baasäravoolu eraldamist lugeda heaks.

Edasisel mudeli kalibreerimisel tuleks arvestada asjaoluga, et kuigi kalibreerimise tulemused olid head, esineb baasäravoolude võrdlemisel saadud tulemustes ebakõlasid. Seega ei saa ainult

vooluhulka kalibreerides reaalses uuringuala hüdroloogilist ja hüdrogeoloogilist situatsiooni kirjeldavat mudelit. Edaspidi tuleks tähelepanu pöörata just suuremate vooluhulkade perioodidele, mil mudeli arvutatud tulemused ülehindavad baasäravoolu osakaalu.

Samuti tuleks viia läbi hüdrograafi lõikamiseks vajalikud meetodikate võrdlused, et leida kõige sobivam meetodika antud uuringualal asetseva jõe vooluhulkade lõikamiseks. Sobiva meetodi leidmine koosneb kolmest etapist: (1) regressioonimeetodite analüüs ja parameetrite võrdlus, (2) õige analüütilise mudeli leidmine. Laialt on levinud lineaarne ja mittelineaarne reservuaarimudel ning astmefunktsiooni seos, (3) analüütilise mudeli kõige optimaalsemate parameetrite leidmine. Lisaks hüdrograafi lõikamisele tuleks kontseptuaalsed mudelid kinnitada teiste meetoditega (nt keemilise uuringu tulemuste, põhjaveetoite mõõtmised pinnaveekogus jm).

Kuigi antud meetodika vajab edasisi uuringuid ja kinnitamist alternatiivsete meetoditega, siis näitab PRMS mudeldamise meetodika uuringualal häid tulemusi; samuti on olemas Eestis mudeldamiseks vajalikud algandmed. PRMS mudeliga oleks edaspidi võimalik hinnata Eesti oludes pinna- ja põhjavee seoseid ja jaotumist.

Modeling of the water balance in the Selja River basin with the PRMS hydrological model

The aims of this Master's thesis are to ascertain the suitability of PRMS (the Precipitation-Runoff Modeling System) and the existing source data for hydrological modeling in Estonian geological conditions and to determine the water balance of the Selja River basin. The work involved the preparation of PRMS model for the Selja River basin and using it to calculate the water balance of this area. The resulting conceptual model was verified with an alternative method – hydrograph separation.

The Gsflow-Arcpy collection of Python scripts was used to create the input files for the PRMS model. These scripts facilitate the pre-processing of source data and the creation of input files for the model. As the scripts were developed for source data from the US, the source data available in Estonia often require additional pre-processing to make them usable as input for the scripts.

For instance, no meteorological data (precipitation distribution, air temperature) in raster format is available in Estonia. Consequently, the values received in Excel format need to be linked to the location of the observation station for creation of raster files before input files for the model can be created. The most extensive part of data preparation turned out to be the classification of simple texture values of the Estonian soil map and using it to determine the fraction share. A more detailed description of the steps of data preparation is provided in the chapter 'Boundary Conditions'. To automate the creation of model input files in the future, it would make sense to supplement the existing Gsflow-Arcpy Python script files or to create an ArcDesktop workflow, based on availability and format of the Estonian source data.

Validation of the model developed for the Selja River basin resulted in an NSE value of 0.749, indicating good efficiency in the modeling of flow rates. The results of modeling were used to create conceptual models for low water and high-water (autumn and spring) periods in the Selja River basin, describing evapotranspiration, distribution of runoffs and groundwater recharge.

The resulting conceptual model was verified by comparing the baseflow values calculated with the model to those found by hydrograph separation of the flow rate measured at the Varangu hydrology station on Selja River. A variation coefficient (monthly average value of 0.14) was used for the comparison of the baseflow distribution and the results indicate a good level of baseflow separation.

In further calibration of the model, it would be important to take into account the fact that, even though the calibration results were good, there are discrepancies in the results of baseflow comparison. Therefore, a calibration of flow rates alone cannot generate a model that describes the actual hydrological and hydrogeological situation in the study area. In the future, particular attention should be paid to periods of higher flow rates for which the results calculated with the model tend to overestimate the share of the baseflow.

In addition, a comparison of methods for hydrograph separation should be performed to identify the best method for separation of the flow rates of the river in this particular study area. Identification of the best method is performed in three stages: (1) analysis of regression methods and comparison of parameters; (2) determining the correct analytical model. Common options include linear and nonlinear reservoir models and a power function relation; (3) identifying the optimal parameters of the analytical model. Verification of conceptual models should also be performed with other methods (e.g., chemical survey, measurement of groundwater recharge into a surface water body) in addition to hydrograph separation.

Even though the proposed methodology requires additional surveys and verification with alternative methods, the method of PRMS modeling has produced good results in the study area and the source data required for modeling in Estonia are now available. The PRMS model can be used in the future for assessing groundwater and surface water interaction and distribution in Estonian conditions.

Tänuavaldused

Tänan kõiki, kes töö valmimisele kaasa aitasid.

Eriline tänu juhendajatele Andres Marandile ja Enn Karrole suure abi, toetuse ja heade soovitude eest. Lisaks tänan suure toetuse ja ideede eest Joonas Pärna, Maile Polikarpust, Leo Vallnerit ja Oliver Koitu.

Kasutatud kirjandus

- Abbaspour, K.C., Rouholahnejad, E., Vaghefi, S., Srinivasan, R., Yang, H., Kløve, B., 2015. A continental-scale hydrology and water quality model for Europe: Calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model. *Journal of Hydrology* 524, 733–752. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.03.027>
- Adeogun, A.G., Sule, B.F., Salami, A.W., Daramola, M.O., 2014. Validation of SWAT model for prediction of water yield and water balance: case study of upstream catchment of Jebba dam in Nigeria. *Int. J. Phys. Nucl. Sci. Eng.* 8, 1–7.
- Astover, A., Kõlli, R., Roostalu, H., Reintam, E., Leedu, E., 2012. Mullateadus. Õpik kõrgkoolile. Eesti Maaülikooli põllumajandus- ja keskkonnainstituut, Tallinn.
- Bauerle, W.L., Bowden, J.D., 2011. Predicting Transpiration Response to Climate Change: Insights on Physiological and Morphological Interactions that Modulate Water Exchange from Leaves to Canopies. *HortScience* 46, 163–166. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.46.2.163>
- Bengtsson, L., 2011. Direct Surface Runoff, in: Singh, V.P., Singh, P., Haritashya, U.K. (Eds.), *Encyclopedia of Snow, Ice and Glaciers*. Springer Netherlands, Dordrecht, pp. 232–234. https://doi.org/10.1007/978-90-481-2642-2_114
- Boussinesq, J., 1904. Recherches théoriques sur l'écoulement des nappes d'eau infiltrées dans le sol et sur le débit des sources. *Journal de Mathématiques Pures et Appliquées* 10, 5–78.
- Brutsaert, W., Nieber, J.L., 1977. Regionalized drought flow hydrographs from a mature glaciated plateau. *Water Resources Research* 13, 637–643. <https://doi.org/10.1029/WR013i003p00637>
- EELIS (Eesti Looduse Infosüsteem - Keskkonnaregister): Keskkonnaagentuur [e-andmebaas] <https://kratt.envir.ee/kratt/auth/login?expired> (23.12.2020)
- Eipre, T., 1987. Pandivere kõrgustiku veevarud ja nende kasutamise võimalusi, in: *Eesti Geograafia Seltsi Aastaraamat*. Eesti NSV Teaduste Akadeemia, Tallinn, pp. 43–58.
- Freeze, R.A., Cherry, J.A., 1979. *Groundwater*. Englewood Cliffs, New Jersey.
- Gardner, M.A., Morton, C.G., Huntington, J.L., Niswonger, R.G., Henson, W.R., 2018. Input data processing tools for the integrated hydrologic model GSFLOW. *Environmental Modelling & Software* 109, 41–53. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2018.07.020>
- Gomez, K.A., Gomez, A.A., 1984. *Statistical procedures for agricultural research*. AN INTERNATIONAL RICE RESEARCH INSTITUTE BOOK, New York.

- Gonfiantini, R., Fröhlich, K., Araguás-Araguás, L., Rozanski, K., 1998. Isotopes in Groundwater Hydrology, in: Kendall, Carol, McDonnell, J.J. (Eds.), Isotope Tracers in Catchment Hydrology. Elsevier, Amsterdam, pp. 203–246. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-81546-0.50014-8>
- Green, W.H., Ampt, G.A., 1911. Studies on Soil Physics. The Journal of Agricultural Science 4, 1–24. <https://doi.org/10.1017/S0021859600001441>
- Gupta, H.V., Sorooshian, S., Yapo, P.O., 1999. Status of Automatic Calibration for Hydrologic Models: Comparison with Multilevel Expert Calibration. Journal of Hydrologic Engineering 4, 135–143. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(1999\)4:2\(135\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(1999)4:2(135))
- Hall, F.R., 1968. Base-Flow Recessions—A Review. Water Resources Research 4, 973–983. <https://doi.org/10.1029/WR004i005p00973>
- Hargreaves, G., Samani, Z., 1985. Reference Crop Evapotranspiration From Temperature. Applied Engineering in Agriculture 1. <https://doi.org/10.13031/2013.26773>
- Hargreaves, G.H., Samani, Z.A., 1982. Estimating Potential Evapotranspiration. Journal of Irrigation and Drainage Engineering—American Society of Civil Engineers (ASCE) 225–230.
- Henson, W.R., Medina, R.L., Mayers, C.J., Niswonger, R.G., Regan, R.S., 2013. CRT—Cascade Routing Tool to Define and Visualize Flow Paths for Grid-Based Watershed Models.
- Herrmann, H., Bucksch, H. (Eds.), 2014. direct runoff, in: Dictionary Geotechnical Engineering/Wörterbuch GeoTechnik: English-German/Englisch-Deutsch. Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 384–384. https://doi.org/10.1007/978-3-642-41714-6_42284
- Horton, R.E., 1933. The role of infiltration in the hydrologic cycle. Transactions of the American Geophysics Union, 14th Annual Meeting 446–460.
- Hughes, J.D., Langevin, C.D., Banta, E.R., 2017. Documentation for the MODFLOW 6 framework (USGS Numbered Series No. 6-A57), Documentation for the MODFLOW 6 framework, Techniques and Methods. U.S. Geological Survey, Reston, VA. <https://doi.org/10.3133/tm6A57>
- Iital, A., Kõrgmaa, V., Pachel, K., Roosalu, K., Pärn, J., Osjamets, M., Hunt, M., 2020. LIFE IP CleanEst projekti tegevus C10.1 veeuuringud. Seiretulemused. LIFE IP CleanEst projekt, Tallinn.

- Jensen, M.E., Haise, H.R., 1963. Estimating Evapotranspiration from Solar Radiation. *Estimating Evapotranspiration from Solar Radiation. Journal of the Irrigation and Drainage Division* 89, 15–41.
- Kirkham, M.B., 2014. *Principles of Soil and Plant Water Relations* (Second Edition). Academic Press, Boston. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-420022-7.05002-3>
- Kumar, S., Godrej, A.N., Grizzard, T.J., 2016. Pre-development conditions to assess the impact of growth in an urbanizing watershed in Northern Virginia. *Journal of Hydrology* 540, 1066–1077. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.07.011>
- Leisk, Ü., 2021. Nitraaditundliku ala põhjavee seire 2020. Eesti Keskkonnauuringute Keskus, Tallinn.
- Leisk, Ü., 2020. Nitraaditundliku ala põhjavee seire 2019. Eesti Keskkonnauuringute Keskus, Tallinn.
- Lischeid, G., Kolb, A., Alewell, C., 2002. Apparent translatory flow in groundwater recharge and runoff generation. *Journal of Hydrology* 265, 195–211. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(02\)00108-7](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(02)00108-7)
- Maa-ameti geoloogiline baaskaart 1:50 000 [e-andmebaas] <https://geoportaal.maaamet.ee/est/Ruumiandmed/Geoloogilised-andmed/Geoloogiline-baaskaart/Geoloogilise-baaskaardi-allalaadimine-p534.html> (29.09.2019)
- Maa-ameti LiDAR kõrgusandmed [e-andmebaas] <https://geoportaal.maaamet.ee/est/Ruumiandmed/Korgusandmed/Laadi-korgusandmed-alla-p614.html> (05.05.2020)
- Maa-ameti mullastiku kaart [e-andmebaas] <https://geoportaal.maaamet.ee/est/Ruumiandmed/Mullastiku-kaart-p33.html> (30.03.2020)
- Maa-ameti topograafiline andmekogu [e-andmebaas] <https://geoportaal.maaamet.ee/est/Ruumiandmed/Eesti-topograafia-andmekogu/Laadi-ETAK-andmed-alla-p609.html> (29.05.2020)
- Maastik, A., 2006. Hüdroloogia ja hüdromeetria. EMÜ Metsandus- ja Maaehituseinstituut, veemajandus osakond, Tartu.
- Maastik, A. (toim), 1993. Pandivere riiklik veekaitseala.
- Magilligan, F.J., Nislow, K.H., 2005. Changes in hydrologic regime by dams. *Geomorphology, Dams in Geomorphology* 71, 61–78. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2004.08.017>
- Maillet, E.T., 1905. *Essais d'hydraulique souterraine & fluviale*,. A. Hermann, Paris.
- Malagò, A., Efstathiou, D., Bouraoui, F., Nikolaidis, N.P., Franchini, M., Bidoglio, G., Kritsotakis, M., 2016. Regional scale hydrologic modeling of a karst-dominant

- geomorphology: The case study of the Island of Crete. *Journal of Hydrology* 540, 64–81. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.05.061>
- Marandi, A., Karro, E., Osjamets, M., Polikarpus, M., Hunt, M., 2020. Eesti põhjaveekogumine seisund perioodil 2014-2019. Eesti Geoloogiateenistus, Rakvere.
- Marandi, A., Osjamets, M., Polikarpus, M., Pärn, J., Raidla, V., Tarros, S., Vallner, L., 2019. Põhjaveekogumite piiride kirjeldamine, koormusallikate hindamine ja hüdrogeoloogiliste kontseptuaalsete mudelite koostamine. Eesti Geoloogiateenistus, Rakvere.
- Marja, R., Seevri, K., Elken, R., Klasen, H., 2017. Nitraatiooni ja taimekaitsevahendite võimalikud allikad nitraaditundliku ala põhja- ja pinnavees. Keskkonnaagentuur, Tartu.
- Markstrom, S.L., Niswonger, R.G., Regan, R.S., Prudic, D.E., Barlow, P.M., 2015a. GSFLOW—Coupled Ground-Water and Surface-Water Flow Model Based on the Integration of the Precipitation-Runoff Modeling System (PRMS) and the Modular Ground-Water Flow Model (MODFLOW-2005).
- Markstrom, S.L., Regan, R.S., Hay, L.E., Viger, R.J., Webb, R.M.T., Payn, R.A., LaFontaine, J.H., 2015b. PRMS, the Precipitation-Runoff Modeling System, Version 4 (Techniques and Methods No. Book 6). U.S. Geological Survey, Virginia.
- Miller, J.D., Kim, H., Kjeldsen, T.R., Packman, J., Grebby, S., Dearden, R., 2014. Assessing the impact of urbanization on storm runoff in a peri-urban catchment using historical change in impervious cover. *Journal of Hydrology* 515, 59–70. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.04.011>
- Monteith, J.L., 1965. Evaporation and environment. *Symposia of the Society for Experimental Biology* 19, 205–234.
- Moriasi, D.N., Moriasi, D.N., Arnold, J.G., Liew, M.W.V., Bingner, R.L., Harmel, R.D., Veith, T.L., 2007. Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. *Transactions of the ASABE* 50, 885–900.
- Muna, M., Kovtun-Kante, A., Trepp, K., Ojamäe, K., Mikomägi, A., Korsjukov, M., 2020. Eesti pinnaveekogumite seisundi 2019. aasta ajakohastatud vahehindang.
- Nash, J.E., Sutcliffe, J.V., 1970. River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles. *Journal of Hydrology* 10, 282–290. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6)
- Pandivere ja Adavere-Põltsamaa nitraaditundliku ala kaitse-eeskiri. Vabariigi Valitsuse määrus. RT I 2003, 10, 49

- Penman, H.L., 1948. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences 193, 120–145. <https://doi.org/10.1098/rspa.1948.0037>
- Perens, R., Kajak, K., Kajak, H., Lang, L., Norman, A., Solovjova, S., Mandla, A., 1978. Aruanne hüdrogeoloogilisest ja ehitusgeoloogilisest kaardistamisest mõõtkavas 1:50 000 maaparanduse eesmärgil 1976.-1978. a (Tapa-Viru-Roela objekt). Geoloogia Valitsus, Keila.
- Polikarpus, M., 2018. Virumaa maavarade võimaliku kaevandamise keskkonnamõjud põhja- ja pinnaveele ning maastikule keskkonnageoloogiliste mudelitega analüüsituna koos alternatiivsete leevendusmeetmetega. Kõide 5. Virumaade mudeli kirjeldus ning kasutusjuhend. Tartu Ülikool, Tartu.
- Polikarpus, M., Karro, E., Jõeleht, A., Rooni, K., 2017. Tartu linna põhjaveevarude ümberhindamine aastani 2045. Tartu Ülikool, Tartu.
- Protasjeva, M.S., Eipre, T. (Eds.), 1972. NSV Liidu pinnaveevarud. 4. köide. Balti regioon [vene keeles]. Gidrometeoizdat, Leningrad.
- Puura, V., Kalla, K., Plado, J., Soesoo, A., Sedman, P., Talviste, P., Jõeleht, A., Polikarpus, M., Marandi, A., Puura, E., Karro, E., Sepp, K., Metsoja, K., Raet, J., 2018. Virumaa maavarade võimaliku kaevandamise keskkonnamõjud põhja- ja pinnaveele ning maastikule keskkonnageoloogiliste mudelitega analüüsituna koos alternatiivsete leevendusmeetmetega. Tartu Ülikool, Tartu.
- Raukas, A., Teedumäe, A. (Eds.), 1997. Pandivere water protection area, in: Geology and Mineral Resource of Estonia. Estionia Academy Publishers, Tallinn, pp. 397–400.
- Richards, L.A., 1931. Capillary conduction of liquids through porous mediums. Physics 1, 318–333. <https://doi.org/10.1063/1.1745010>
- Rodhe, A., 1987. The Origin of Streamwater Traced by Oxygen18. Uppsala University, Uppsala 260.
- Shuttleworth, W.J., 1993. Evaporation, in: Maidment, D.R. (Ed.), Handbook of Hydrology. McGraw-Hill Book Company, New York, p. 4.1-4.53.
- Sinha, R.K., 2004. Modern plant physiology. Alpha Science, Pangbourne.
- Suuroja, K., All, T., Mardim, T., Otsmaa, M., Ploom, K., Vahtra, T., Veski, A., 2005. Baaskaardi Kadrina (6433) lehe geoloogilise kaardikomplekti koostamine ja digitaalse andmebaasi loomine. Seletuskiri. OÜ Eesti Geoloogiakeskus, Tallinn.

- Suuroja, K., Kaljuläte, K., Mardim, T., Morgen, E., Ploom, K., Shtokalenko, M., Vahtra, T., 2015. Baaskaardi Väike-Maarja (6532) lehe geoloogilise kaardikomplekti koostamine ja digitaalse andmebaasi loomine. Seletuskiri. OÜ Eesti Geoloogiakeskus, Tallinn.
- Suuroja, K., Ploom, K., Mardim, T., All, T., Otsmaa, M., Veski, A., 2006. Baaskaardi Rakvere (6434) lehe geoloogilise kaardikomplekti koostamine ja digitaalse andmebaasi loomine. Seletuskiri. OÜ Eesti Geoloogiakeskus, Tallinn.
- Tallaksen, L.M., 1995. A review of baseflow recession analysis. *Journal of Hydrology* 165, 349–370. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(94\)02540-R](https://doi.org/10.1016/0022-1694(94)02540-R)
- Tani, M., 1997. Runoff generation processes estimated from hydrological observations on a steep forested hillslope with a thin soil layer. *Journal of Hydrology* 200, 84–109. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(97\)00018-8](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(97)00018-8)
- Terasmaa, J., Vainu, M., Loide, E., Pajula, R., Raukas A., 2015. Põhjaveekogumi veest sõltuvad ökosüsteemid, nende seisundi hindamise kriteeriumid ja seirevõrk. TLÜ Ökoloogia Instituut, Tallinn.
- Terasmaa, J., Vainu, M., Vandell, E., Puusepp, L., Kapanene, G., Vaasma, T., Koit, O., Jõelet, A., Kohv, M., Polikarpus, M., 2019. Hüdrogeoloogilise ja limnoloogilise uuringu läbiviimine koos loodusdirektiivi järvedele lubatava veetaseme kõikumise vahemiku määramisega Kurtna maastikukaitsealal. Tallinna Ülikool ja Tartu Ülikool, Tallinn.
- Thiemig, V., Rojas, R., Zambrano-Bigiarini, M., Roo, A., 2013. Hydrological evaluation of satellite-based rainfall estimates over the Volta and Baro-Akobo Basin. *Journal of Hydrology* 499, 324–338. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.07.012>
- Thompson, A.M., Misra, D., Daanen, R.P., 2011. Runoff Generation, in: Singh, V.P., Singh, P., Haritashya, U.K. (Eds.), *Encyclopedia of Snow, Ice and Glaciers*. Springer Netherlands, Dordrecht, pp. 953–955. https://doi.org/10.1007/978-90-481-2642-2_457
- Thornthwaite, C.W., 1948. An Approach toward a Rational Classification of Climate. *Geographical Review* 38, 55–94. <https://doi.org/10.2307/210739>
- Vallner, L., Metslang, T., 1970. Intensiivse veevahetuse tsooni põhjavete miinimumäravool ja piesomeetriline režiim Eestis. Eesti NSV Teaduste Akadeemia. Geoloogia Instituut, Tallinn.
- Vallner, L., Porman, A., 2016. Groundwater flow and transport model of the Estonian Artesian Basin and its hydrological developments. *Hydrology Research* 47, 814–834. <https://doi.org/10.2166/nh.2016.104>
- Viessman Jr., W., Lewis, G.L., 1996. *Introduction to Hydrology*, 4th Edition. ed. HarperCollins College Publishers, New York.

- Weiler, M., McDonnell, J.J., Meerveld, I.T., Uchida, T., 2006. Subsurface Stormflow, in: Anderson, M.G. (Ed.), Encyclopedia of Hydrological Sciences. American Cancer Society. <https://doi.org/10.1002/0470848944.hsa119>
- Wittenberg, H., 1994. Nonlinear analysis of flow recession curves. IAHS 221, 61–67.
- Wittenberg, H., Sivapalan, M., 1999. Watershed groundwater balance estimation using streamflow recession analysis and baseflow separation. Journal of Hydrology 219, 20–33. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(99\)00040-2](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(99)00040-2)
- WWAP (ÜRO ülemaailmne vee hindamise programm). 2017. ÜRO maailma veearengu aruanne 2017. Heitvesi: Kasutamata ressurs. Pariis, UNESC
- Yang, W., Xiao, C., Liang, X., 2020. Extraction Method of Baseflow Recession Segments Based on Second-Order Derivative of Streamflow and Comparison with Four Conventional Methods. Water 12, 1953. <https://doi.org/10.3390/w12071953>
- Zhenghui, X., Fengge, S., Xu, L., Qingcun, Z., Zhenchun, H., Yufu, G., 2003. Applications of a surface runoff model with horton and dunne runoff for VIC. Adv. Atmos. Sci. 20, 165–172. <https://doi.org/10.1007/s00376-003-0001-z>

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Marlen Hunt

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) minu loodud teose „**Selja jõe valgla veebilansi modelleerimine rakendades PRMS hüdroloogilist mudelit**“, mille juhendajad on Andres Marandi ja Enn Karro, reprodutseerimiseks eesmärgiga seda säilitada, sealhulgas lisada digitaalarhiivi DSpace kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.
2. Annan Tartu Ülikoolile loa teha punktis 1 nimetatud teos üldsusele kättesaadavaks Tartu Ülikooli veebikeskkonna, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace kaudu Creative Commons'i litsentsiga CC BY NC ND 3.0, mis lubab autorile viidates teost reprodutseerida, levitada ja üldsusele suunata ning keelab luua tuletatud teost ja kasutada teost ärieesmärgil, kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.
3. Olen teadlik, et punktides 1 ja 2 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
4. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei riku ma teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse õigusaktidest tulenevaid õigusi.

Marlen Hunt

31.05.2021